

Analyse der Einflussgrößen auf die Entstehung und Intensität von Reifenspuren

Vom Fachbereich Maschinenbau der
Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Gunther Seipel
aus Darmstadt

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek
Tag der Einreichung:	14.03.2013
Tag der mündlichen Prüfung:	29.05.2013

Darmstadt, 2013

D 17

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt. Die Inhalte wurden während eines von mir geleiteten, viereinhalb jährigen Forschungsprojekts in Zusammenarbeit mit der Mercedes Benz Unfallforschung erarbeitet.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, dem Leiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik, für die erstklassige und zielführende Betreuung. Durch die tiefgehenden Diskussionen, die gewährten Freiheiten bei der Anfertigung der Dissertation, aber auch durch den hohen Anspruch an sich selber und seine Mitarbeiter hat er entscheidend zu dem Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Meinem Korreferenten, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek, Leiter des Instituts für Dynamik und Schwingungen der Leibnitz-Universität Hannover, danke ich ganz herzlich für die Übernahme des Korreferats sowie den freundlichen Empfang und den fachlichen Austausch an seinem Institut.

Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Bert Breuer, dem ehemaligen Leiter und Gründer des Fachgebiets Fahrzeugtechnik, danke ich für seine Unterstützung und Anregungen in meinen Doktorandenseminaren, die mir vor allem zu Beginn meiner Arbeit bei der Konzentration auf die wesentlichen Fragestellungen geholfen haben.

Stellvertretend für die Daimler AG danke ich Herrn Dr.-Ing. Frank Baumann und Herrn Dipl.-Ing. Ralf Hermanutz, die mich über die Projektlaufzeit begleitet und unterstützt haben. Durch die sehr offene, aber auch kritische Diskussion fachlicher Themen haben sie mir entscheidende Impulse für das Vorankommen der Arbeit gegeben.

Allen Mitarbeitern des Fachgebiets Fahrzeugtechnik danke ich für die sehr angenehme und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Besonderer Dank gilt an dieser Stelle der mechanischen Werkstatt, die mir stets unkompliziert und mit großem Einsatz bei der Umsetzung von Konstruktionen und Reparaturen geholfen und damit entscheidend zum Erfolg der Arbeit beigetragen hat. Einen ganz herzlichen Dank für die vielen unvergesslichen Erlebnisse und die humorvolle Zusammenarbeit richte ich an meine ehemaligen Bürokollegen Herrn Dr.-Ing. Florian Füllgrabe, Herrn Dr.-Ing. Mathias Haag und Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Fischer.

Meinem ehemaligen Betreuer und Freund, Herrn Dr.-Ing. Angelo Sardá, danke ich ganz herzlich für seine Unterstützung und Bestärkung, den Weg der Promotion am Fachgebiet Fahrzeugtechnik einzuschlagen.

Weiterer Dank gilt allen studentischen Mitarbeitern, die im Rahmen einer Abschlussarbeit bei mir einen Beitrag zu dem Gelingen der Arbeit geleistet haben. Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen studentischen Hilfskräften, die mich teilweise über die ge-

samte Projektlaufzeit hinweg begleitet und mich mit größtem Engagement in entscheidenden Momenten unterstützt haben.

Meinen Eltern Helmut und Dorothée Seipel danke ich herzlich für ihre liebevolle Unterstützung während meiner gesamten schulischen und universitären Ausbildung, die mir den beschrittenen Weg erst ermöglicht hat.

Für ihr großes Verständnis, die Unterstützung und den moralischen Rückhalt während der Anfertigung dieser Arbeit möchte ich meiner lieben Frau Tiphaine ganz herzlich danken, ohne die ich den nötigen Ausgleich zur Arbeit sicherlich nicht gefunden hätte.

Gunther Seipel

Darmstadt, August 2013

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen.....	VII
Formelzeichen und Indizes	VIII
Zusammenfassung	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Zielsetzung.....	1
1.2 Methodik und Aufbau der Arbeit.....	3
2 Stand der Forschung und Technik.....	5
2.1 Verwendung von Reifenspurmerkmalen in der Unfallrekonstruktion.....	5
2.1.1 Arten von Reifenspuren	5
2.1.2 Rückschlüsse auf fahrdynamische Parameter aus Reifenspuren	9
2.1.3 Bewertung der Sichtbarkeit von Reifenspuren	16
2.2 Entstehung von Reibspuren	25
2.2.1 Reifenseitiger Anteil.....	25
2.2.2 Fahrbahnseitiger Anteil	27
2.3 Zwischenfazit und Ableitung des Forschungsbedarfs	29
3 Modellbildung.....	31
3.1 Grundsätzliche Annahmen.....	31
3.2 Reibkraft	33
3.3 Reibbreite	36
3.4 Spurzeichnungssensitivität	40
3.4.1 Tribologische Einflussgrößen	40
3.4.2 Optische Einflussgrößen	43
3.4.3 Ableitung einer Kenngröße	46
3.5 Sichtbarkeit.....	47
3.6 Zwischenfazit	48
4 Methodik.....	49
4.1 Zentraler Ansatz der Untersuchung	49
4.2 Versuchswerkzeuge	50
4.2.1 Reifenmessanhänger PETRA.....	50
4.2.2 Mobiler Linearprüfstand VERINA	53
4.2.3 Reifen	56
4.2.4 Fahrbahn.....	60
4.2.5 Verschleißmessung.....	61

4.2.6	Sichtbarkeitsbewertung.....	61
4.3	Versuchsmethodik	66
4.3.1	Versuchsvorbereitung.....	67
4.3.2	Versuchsdurchführung	67
4.3.3	Ermittlung der Kenngrößen aus den Messwerten.....	69
5	Ergebnisse.....	74
5.1	Sichtbarkeit.....	74
5.1.1	Einfluss der Bildaufnahme.....	74
5.1.2	Einfluss der Bildverarbeitung	79
5.1.3	Zwischenfazit.....	82
5.2	Reifen- und Fahrbahneigenschaften.....	83
5.2.1	Verschleißrate.....	85
5.2.2	Schwärzungsrate	90
5.2.3	Spurzeichnungssensitivität.....	92
5.2.4	Zwischenfazit	94
5.3	Fahrdynamische Einflussgrößen	98
5.3.1	Längsschlupf und Schräglaufwinkel.....	99
5.3.2	Übertragbarkeit von VERINA- auf PETRA-Messungen.....	104
5.3.3	Zwischenfazit.....	105
5.4	Diskussion	107
6	Gesamtfazit und Ausblick	109
A	Anhang.....	112
A.1	VERINA-Versuche	112
A.1.1	Verschleißhöhe über Flächenpressung.....	112
A.1.2	Verschleißhöhe über Gleitgeschwindigkeit.....	114
A.1.3	Verschleißrate.....	115
A.1.4	Schwärzungsrate	116
A.2	PETRA-Versuche	117
A.2.1	Kontrast über Schlupf	117
	Literaturverzeichnis	118
	Eigene Veröffentlichungen	123
	Betreute studentische Arbeiten.....	124

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
<i>ABR</i>	Acrylate-Butadiene Rubber
<i>ABS</i>	Anti-Blockier-System
<i>CE</i>	ContiEcoContact 3
<i>CS</i>	ContiSportContact 3
<i>CSF</i>	Critical Speed Formula
<i>DOT</i>	Department of Transportation
<i>EES</i>	Energy Equivalent Speed
<i>ETRTO</i>	The European Tyre and Rim Technical Organization
<i>GE</i>	Goodyear Excellence
<i>LI</i>	Load Index
<i>Lkw</i>	Lastkraftwagen
<i>MO</i>	Mercedes Original
<i>MOE</i>	Mercedes Original Extended
<i>NBR</i>	Nitrile-Butadiene Rubber
<i>NR</i>	Natural Rubber
<i>NTS</i>	Negative Texture Surface
<i>PETRA</i>	Personenwagen-Reifen-Traktions-Messanhänger
<i>Pkw</i>	Personenkraftwagen
<i>PS</i>	Pirelli Sottozero W210
<i>SBR</i>	Styrene-Butadiene Rubber
<i>SI</i>	Speed Index
<i>UTQG</i>	Uniform Tire Quality Grade
<i>UV</i>	Ultraviolett
<i>VERINA</i>	Versuchseinrichtung zur Reifenspur-Intensitäts-Analyse

Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
μ	./.	Reibwert
a	m/s ²	Beschleunigung
A	m ²	Fläche
b	m	Breite
B		Pacejka-Parameter
c	./.	Reifensteifigkeit
C		Regressionskoeffizient
d	m	Durchmesser
D	./.	Farbdichte
E	J	Energie
F	N	Kraft
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
G		Grauwert
\bar{G}		Gemittelter Grauwert
h	m	Höhe
I	W/sr	Strahlungsintensität
k	N/m	Steifigkeit
K	./.	Kontrast
l	m	Länge
m	kg	Masse
M	Nm	Moment
n		Exponent
P	W	Leistung
p	Pa	Flächenpressung
r	m	Radius
R^2	./.	Bestimmtheitsmaß
s	m	Strecke
SD	m	Striation Distance
t	s	Zeit
TD	m	Tread Block Distance
v	m/s	Geschwindigkeit
V	m ³	Volumen
W	Nm	Arbeit
x	m	Weg in x-Richtung
\ddot{x}	m/s ²	Beschleunigung in x-Richtung
y	m	Weg in y-Richtung
z	m	Weg in z-Richtung
α	°	Schräglaufwinkel

Symbol	Einheit	Beschreibung
β	°	Schlupfwinkel
γ	m ³ /Nm	Verschleißrate
ε	./.	Verhältnis der Ellipsen-Halbachsen
ζ	m/N	Spurzeichnungssensitivität
θ	°	Maserungswinkel
κ	./.	Sichtbarkeitsfaktor
λ	./.	Schlupf
ξ	1/m	Schwärzungsrate
ρ	kg/m ³	Dichte
τ	./.	Remissionsgrad
χ	./.	Sättigungsverhältnis
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit

Index	Beschreibung
<i>0</i>	Ausgangszustand
<i>1</i>	Endzustand
<i>B</i>	Bremsung
<i>Bg</i>	Hintergrund
<i>c</i>	Kollision
<i>cov</i>	Bedeckung
<i>d</i>	Deformation
<i>Dot</i>	Druckpunkt
<i>dyn</i>	dynamisch
<i>eff</i>	effektiv
<i>Fb</i>	Fahrbahn
<i>g</i>	Gleiten
<i>i</i>	innen
<i>kin</i>	kinetisch
<i>krit</i>	kritisch
<i>L</i>	Reifenlatsch
<i>m</i>	gemittelt
<i>max</i>	maximal
<i>mean</i>	Mittelwert
<i>N</i>	Normalenrichtung
<i>n</i>	normiert
<i>neg</i>	Negativanteil
<i>Pump</i>	Pumpe
<i>R</i>	Reibung
<i>res</i>	resultierend
<i>S</i>	Spur
<i>V</i>	Verschleiß
<i>x</i>	Koordinatenrichtung x
<i>y</i>	Koordinatenrichtung y

z	Koordinatenrichtung z
λ	Schlupf

Zusammenfassung

Bei der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen wird angenommen, dass Reifenspuren beim Erreichen beziehungsweise Überschreiten der Kraftschlussgrenze zwischen Reifen und Fahrbahn auftreten. In der Praxis werden jedoch auch sichtbare Reifenspuren unterhalb dieses Bereichs beobachtet sowie Unterschiede in der Intensität sichtbarer Reifenspuren, die bei konventionellen Rekonstruktionsmethoden unberücksichtigt bleiben. Ein konkretes physikalisches Modell zur Beschreibung der Voraussetzungen, unter denen eine Reifenspur entsteht, sowie der physikalischen Zusammenhänge zwischen fahrdynamischen Einflussparametern und der Intensität von Reifenspuren existiert nicht.

Die vorliegende Arbeit untersucht die Voraussetzungen, unter denen es zu Reibspurzeichnungen auf trockenen befestigten Fahrbahnen kommt sowie den Einfluss fahrdynamischer Größen auf deren tatsächliche Intensität. Das Ziel der Untersuchung besteht in der Klärung der Frage, ob und unter welchen Bedingungen ein eindeutiger Zusammenhang zwischen fahrdynamischen Größen und der Spurintensität bestimmt werden kann.

Die in dieser Arbeit entwickelte, physikalisch motivierte Modellvorstellung identifiziert die Höhe der im Reifenlatsch aufgrund von Gleitreibung auftretenden breitenbezogenen Reibkraft als bestimmende Größe für die Intensität der Reifenspur in Abhängigkeit der tribologischen und optischen Reifen- und Fahrbahneigenschaften, die mit dem Begriff der Spurzeichnungssensitivität zusammengefasst werden.

Der zentrale Ansatz der experimentellen Untersuchung besteht in der möglichst isolierten Untersuchung der in die disjunkten Kategorien Fahrdynamik, Reifen- und Fahrbahneigenschaften und Sichtbarkeit eingeteilten Einflussgrößen auf die Wirkkette der Reifenspurentstehung. Als Versuchswerkzeuge dienen ein Reifenmessanhänger zur unabhängigen Variation von Längsschlupf, Schräglaufwinkel und Radlast sowie ein Reibprüfstand für Reifenprofilblöcke, der die Untersuchung der Spurzeichnungssensitivität unter kontrollierten Reibbedingungen ermöglicht. Für die Bewertung der Intensität als Kontrast zwischen Reifenspur und Fahrbahn wurde ein fotometrisches Verfahren entwickelt, mit dem erstmals eine objektive und zuverlässige Bewertung des Reifenspurkontrasts möglich ist.

Als Ergebnis der Arbeit liegt ein grundlegendes physikalisches Modell zur Entstehung von Reibspuren vor, das sich im Rahmen der durchgeführten Versuche bewährt hat. Die experimentellen Ergebnisse bestätigen, dass sichtbare Reifenspuren entstehen, sobald es zu Gleitvorgängen zwischen Reifen und Fahrbahn in Form von Gleitschlupf kommt und eine bestimmte breitenbezogene Reibkraft überschritten wird. Dabei hat sich die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Untersuchungen an gleitenden Reifenprofilblöcken auf einen Reifen unter Längsschlupf als valide erwiesen. Bestehende Theorien, die das Erreichen des Reibwertmaximums als Voraussetzung zur Reifenspurentstehung annehmen,

wurden klar falsifiziert. Die Höhe der erforderlichen Reibkraft an der Sichtbarkeitsgrenze ist dabei im Wesentlichen von den Reifen- und Fahrbahneigenschaften abhängig. Dies wurde erstmalig durch die unabhängige Betrachtung von Verschleißhöhe und Spurintensität nachgewiesen. Die Variation der Fahrbahn hat dabei einen deutlich größeren Einfluss auf die Spurzeichnungssensitivität als die Variation der Reifenmischung gezeigt. Die Ergebnisse falsifizieren damit die Annahme, dass die Intensität von Reifenspuren alleine von der Höhe des Verschleißes abhängig ist. Die Arbeit leistet somit einen Beitrag zum Verständnis der Entstehung sichtbarer Reibspuren, der Identifikation relevanter Einflussgrößen auf die Wirkkette und zur Klärung der Frage, welche Rückschlüsse unter welchen Bedingungen auf Grundlage der Reifenspurintensität zulässig sind.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Im Jahr 2011 gab es in Deutschland rund 2,3 Millionen polizeilich erfasste Unfälle, davon über 300.000 mit Personenschaden¹. An der Aufklärung von Unfällen mit schwerwiegenden Sach- und Personenschäden sind nicht nur Justiz oder Versicherungsunternehmen interessiert, sondern auch Fahrzeughersteller, beispielsweise zur Ableitung von aktiven und passiven Sicherheitsmaßnahmen oder der Klärung von Produkthaftungsansprüchen.

Bei der Rekonstruktion des Unfallhergangs sind je nach Fragestellung ganz verschiedene Arten von Unfalldaten (vgl. Abbildung 1.1) für die Sachverständigen von Relevanz.

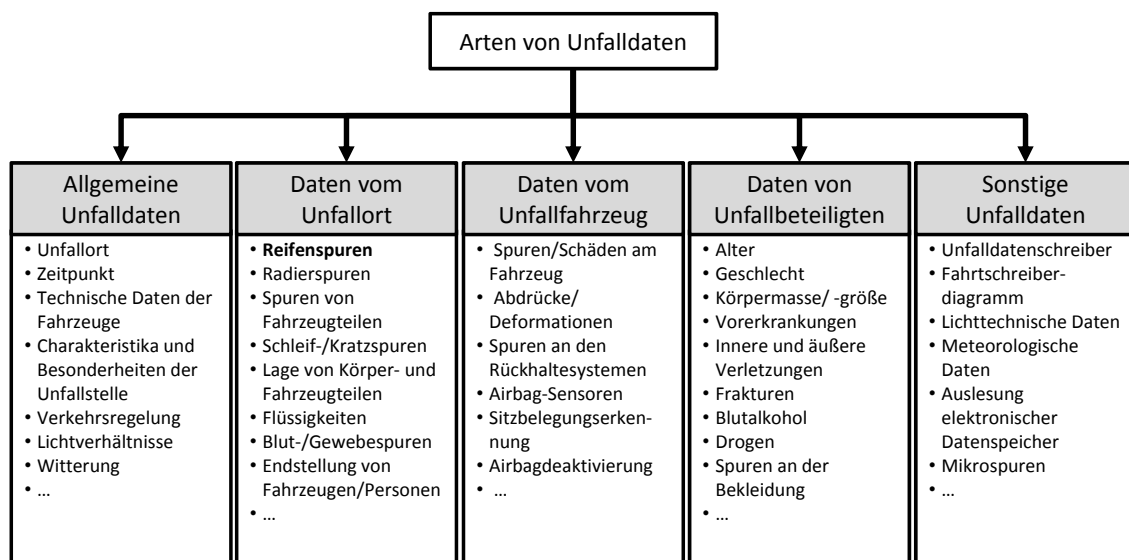


Abbildung 1.1: Arten verschiedenster Unfalldaten mit Beispielen²

Reifenspuren nehmen unter den Unfalldaten eine besondere Rolle ein. Da der Reifen als Bindeglied zwischen Fahrzeug und Fahrbahn im Normalfall die durch die Bewegung des Fahrzeugs wirkenden Kräfte überträgt, können Reifenspuren vielfältige Informationen geben. In diesem Zusammenhang bezeichnen Reifenspuren ganz allgemein Kontaktsuren der Fahrzeugreifen. Dazu zählen nicht nur Spuren auf dem Untergrund, sondern auch Spuren an Kollisionspartnern (zum Beispiel andere Fahrzeuge, Hindernisse, Personen)³.

¹ www.destatis.de, Zugriff am 03.01.2013

² vgl. Burg et al.: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, 2007, S. 28

³ www.unfallaufnahme.info, Zugriff am 11.01.2013

Für die Rekonstruktion der Unfallursache ist es oftmals wichtig, die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Fahrzeuge vor dem Zusammenstoß zu kennen. Da die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn in der Fahrbahnebene kraftschlüssig nach den Prinzipien der Gummireibung erfolgt, können Reifenspuren⁴ Informationen bezüglich der Kraftverhältnisse am Reifen aus beschleunigten Bewegungen (zum Beispiel Bremsen, Beschleunigen, Kurvenfahrt, Driften, Schleudern, Ausweichen oder Slalomfahrt) liefern. Dabei wird im Allgemeinen angenommen, dass sichtbare Reifenspuren aufgrund von Seiten- oder Längskräften dann entstehen, wenn die Kraftschlussgrenze des Reifens erreicht beziehungsweise überschritten wird⁵. Rekonstruktionswerkzeuge nutzen diese Annahme, um ausgehend von variierenden Startwerten (Startgeschwindigkeit, Fahrtrichtung, Verzögerung, Lenkwinkel, etc.) eines parametrisierten Fahrzeugmodells Reifenspuren iterativ zu simulieren, bis diese zu dem tatsächlich am Unfallort vorgefundenem Spurenbild hinsichtlich Länge und Verlauf sowie den Endlagen der Fahrzeuge passen.

Eine Unterscheidung der Sichtbarkeit nach verschiedenen Intensitätsstufen⁶ erfolgt in der Regel nicht⁷. Es ist aber bekannt, dass beispielsweise Reifenspuren aus Blockierbremsungen oder Schleudervorgängen sehr intensiv ausgeprägt sind, während bei ABS-Bremsungen oder Kurvenfahrten deutlich schwächere oder gar keine sichtbaren Reifenspuren entstehen⁸. Unterschiedliche Ausprägungen in der Intensität von Reifenspuren werden auch für verschiedene Fahrbahnbeläge⁹ und für verschiedene Reifentypen¹⁰ beobachtet. Es stellt sich daher die Frage, inwiefern die Intensität einer Reifenspur zusätzliche Informationen über fahrdynamische Größen am Reifen liefern kann. Ein physikalisch motiviertes Modell, welches den Zusammenhang zwischen dem Auftreten sowie der Intensität von Reifenspuren und fahrdynamischen Größen am Reifen beschreibt, ist nicht bekannt.

Eine wesentliche Einschränkung in der Bewertung der Intensität besteht darin, dass neben tatsächlichen Intensitätsunterschieden insbesondere die Erkennbarkeit schwacher Reifenspuren von den Sichtbedingungen und den perzeptorischen Fähigkeiten des Beobachters abhängen. Ob und wie stark eine Reifenspur sichtbar ist, wird in der Praxis

⁴ Reifenspuren bezeichnen hier und im Folgenden reibungsinduzierte Verfärbungen (i.d.R. Schwärzungen) auf befestigten Fahrbahnen. Fahrspuren, zum Beispiel durch Zwischenmedien auf der Fahrbahn, oder Reifenabdrücke auf losem Untergrund liegen nicht im Fokus der Arbeit (vgl. Kapitel 2.1.1).

⁵ Danner et al.: Technische Analyse von Verkehrsunfällen, 1981, S. 266

⁶ Im Folgenden wird unter Intensität einer Reifenspur deren schwärzungsabhängiger Kontrast zur Fahrbahn verstanden. Eine Abgrenzung zum physikalischen Begriff der Strahlungsintensität erfolgt in Kapitel 3.4.2.

⁷ vgl. Leser et al.: Der Bremsvorgang, 2007, S. 335

⁸ vgl. Burg: Spurenzeichnung und Bremsverzögerung bei Notbremsungen mit Personenkraftwagen mit und ohne automatischem Blockierverhinderer, 1980

⁹ Engels: Die Bedeutung des Spurzeichnungsverhaltens von PKW mit ABV für die Unfallrekonstruktion, 1990, S. 46

¹⁰ Baumann et al.: Tire Mark Analysis of a Modern Passenger Vehicle with Respect to Tire Variation, Tire Pressure and Chassis Control Systems, 2009, S. 4

rein subjektiv bewertet. Ein objektives Verfahren zur Intensitätsbewertung ist nicht bekannt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Klärung der Fragestellung, ob und unter welchen Bedingungen sowie bezüglich welcher fahrdynamischen Größen am Reifen quantifizierbare Rückschlüsse auf Basis der Intensität einer Reifenspür möglich sind.

1.2 Methodik und Aufbau der Arbeit

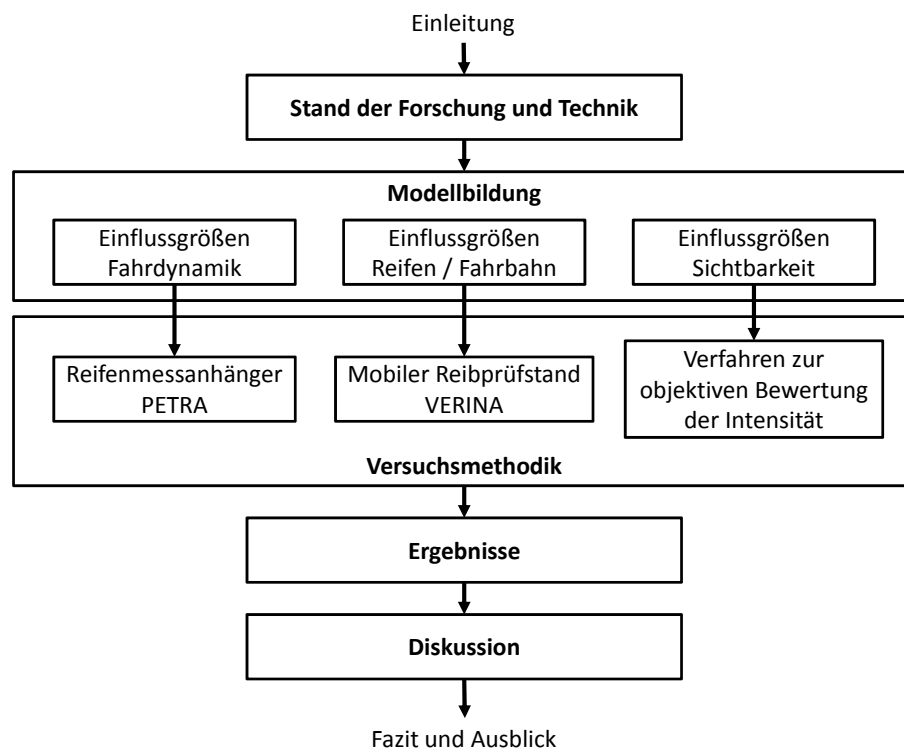


Abbildung 1.2: Methodik und Aufbau der Arbeit

Die Methodik der Arbeit ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Kapitel 1 führt allgemein in die Thematik und Motivation der Arbeit ein. In Kapitel 2 ist der Stand der Forschung und Technik bezüglich der Verwendung von Reifenspürmerkmalen in der Unfallrekonstruktion und Methoden zur Bewertung der Sichtbarkeit sowie Modellvorstellungen zur Entstehung von Reifenspuren zusammengefasst. Der daraus abgeleitete Forschungsbedarf stellt die Grundlage für die darauf folgenden Kapitel dar.

Kapitel 3 befasst sich mit der Modellbildung zu den Entstehungsmechanismen von reibungsbedingten Reifenspuren auf befestigten Fahrbahnen und der Identifikation relevanter fahrdynamischer Parameter. Der zentrale Ansatz der Arbeit liegt in der Unterteilung der aus der Modellbildung abgeleiteten Einflussgrößen auf die Intensität von Reifenspuren in drei disjunkte Bereiche: Fahrdynamik, Reifen- und Fahrbahneinfluss sowie Sichtbarkeit.

Die Versuchsmethodik zur Überprüfung der getroffenen Modellannahmen wird in Kapitel 4 vorgestellt. Dazu gehören die Versuchswerkzeuge, wie der Reifenmessanhänger PETRA zur Untersuchung fahrdynamischer Einflussgrößen und der mobile Linear-Reibprüfstand VERINA zur Bestimmung des Reifen-Fahrbahn-Einflusses, sowie das entwickelte Verfahren zur objektiven Bewertung der Intensität der Reifenspuren, welches auch der Untersuchung rein optischer Einflussgrößen dient.

Die Versuchsergebnisse werden in Kapitel 5 dargestellt und hinsichtlich ihrer Objektivität, Reliabilität und Validität diskutiert.

Kapitel 6 fasst die Ergebnisse resümierend zusammen und gibt einen Ausblick hinsichtlich der Anwendung der Ergebnisse und des weiteren Forschungsbedarfs.

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Verwendung von Reifenspürmerkmalen in der Unfallrekonstruktion

Reifenspuren werden in der Unfallrekonstruktion in verschiedene Kategorien beziehungsweise Arten unterteilt, deren Systematik sich in der Regel aus dem Entstehungsmechanismus herleitet. Je nach Spurenart können unterschiedliche Informationen über das beteiligte Unfallfahrzeug oder den Unfallhergang abgeleitet werden. Allen Reifenspuren gemein ist allerdings die Information über die Position beziehungsweise die Trajektorie des Fahrzeugs während des Unfallhergangs an der Stelle der vorgefundenen Reifenspur¹¹. Im Folgenden werden zunächst die verschiedenen Reifenspurarten und deren Merkmale vorgestellt und auf die Verwendung in der Unfallrekonstruktion eingegangen.

2.1.1 Arten von Reifenspuren

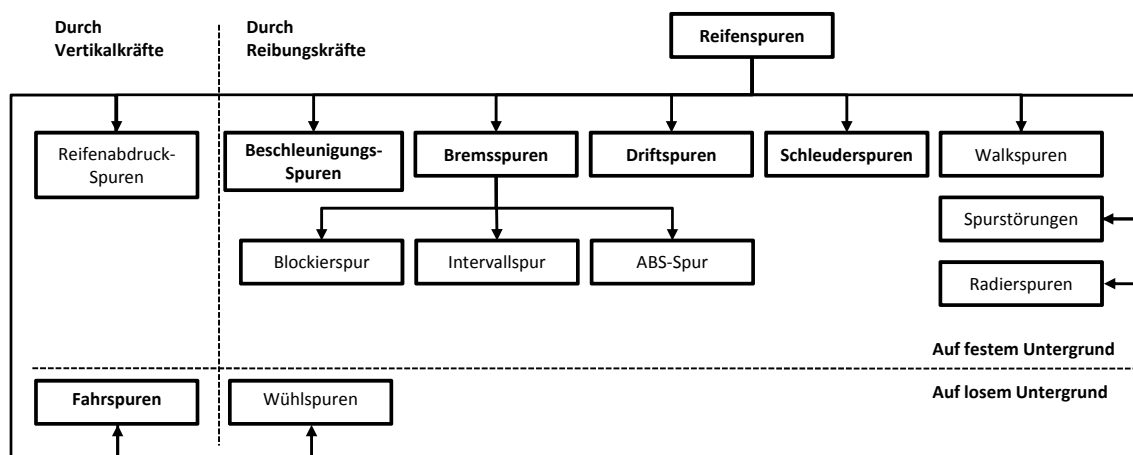


Abbildung 2.1: Arten von Reifenspuren^{12,13} und deren Einteilung nach Entstehungsursache und Fahrbahnbeschaffenheit.

Abbildung 2.1 stellt eine Übersicht der am häufigsten in der Literatur zu findenden Einteilungen von Reifenspuren dar^{12,13}. Als wesentliche Unterscheidungsmerkmale können dabei die verursachenden Kräfte (Vertikal- oder Reibkräfte) und die Beschaffenheit des Untergrunds (unbefestigt oder befestigt) genannt werden. Die Einteilung der

¹¹ Diekel: Unfallspuren auf der Fahrbahn, 2007, S. 539

¹² www.unfallaufnahme.info, Zugriff am 11.01.2013

¹³ Ahlgrimm et al.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 1, 1997, S.68

Spuren nach Fahr-, Beschleunigungs-, Brems-, Drift- und Schleuderspuren (in der Abbildung fett dargestellt) ist weit verbreitet und lässt eine klare Unterscheidung der Spuren zu. Die weiteren aufgeführten Spurenarten sind hingegen nur in einigen Quellen zu finden und werden teilweise als Teilmenge der genannten Hauptarten genannt. Eine einheitliche Definition, sowohl im deutsch- als auch im englischsprachigen Raum, konnte nicht gefunden werden.

Fahrspuren entstehen durch das freie Abrollen eines Rades in weichem, formstabilen Untergrund (zum Beispiel Erde oder Schnee). Dadurch kommt es zur unverzerrten Abzeichnung des Reifenprofils im Untergrund. Dies kann beispielsweise bei Unfällen mit Fahrerflucht dazu verwendet werden, das beteiligte Fahrzeug anhand des Reifenprofils zu identifizieren¹⁴. Daneben lässt sich aus Fahrspuren auch die Trajektorie des Fahrzeugs rekonstruieren.

Reifenabdruckspuren entstehen ebenfalls wie Fahrspuren durch das freie Abrollen des Rades, allerdings nicht durch Deformation des losen Untergrundes, sondern auf befestigten Fahrbahnen durch Auftragen eines Zwischenmediums (zum Beispiel Schmutz, Wasser, ausgetretene Betriebsflüssigkeiten oder Blut). Oftmals werden sie auch als Untermenge der Fahrspuren betrachtet und hinsichtlich ihres Informationsgehalts analog verwendet^{15,16}.

Wühlspuren beschreiben Spuren, die auf losem Untergrund durch Reibung entstehen. Dadurch wird die Oberfläche des Untergrundes abgetragen beziehungsweise deformiert. Wühlspuren können im Gegensatz zu den anderen Spurenarten nicht nur durch Reifen, sondern auch andere Teile des Fahrzeugs oder Personen verursacht werden¹⁵. Wühlspuren geben im wesentlichen Auskunft über die Trajektorie des verursachenden Fahrzeugs beziehungsweise Körpers.

Reifenspuren auf befestigten Fahrbahnen, die ohne Zwischenmedien alleine aufgrund der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn entstehen, werden allgemein auch als **Reibspuren** bezeichnet¹⁷. Dabei handelt es sich in der Regel um dunkle Spuren auf der Fahrbahn, die durch Abrieb von Reifenpartikeln entstehen und unter bestimmten Voraussetzungen bei bindemittelreichen Asphaltfahrbahnen durch thermisch bedingtes Erweichen von Bindemittel (Bitumen) verstärkt werden können¹⁸. Insbesondere auf hellen Betonfahrbahnen kann der Abrieb von Staub und Schmutz zu Spuren führen, die heller als der Rest der Fahrbahn sind¹⁹.

Bremsspuren bezeichnen in diesem Zusammenhang Reibspuren, die aufgrund von Reibung durch Bremsschlupf am Reifen entstehen. Dabei zeichnet sich die Umfangs-

¹⁴ Diekel: Unfallspuren auf der Fahrbahn, 2007, S. 539

¹⁵ www.unfallaufnahme.info, Zugriff am 11.01.2013

¹⁶ Halonbrenner: Die Beurteilung von Reifenspuren, 1993, S. 202

¹⁷ Danner et al.: Technische Analyse von Verkehrsunfällen, 1981, S. 266

¹⁸ Eine detaillierte Betrachtung der bekannten Entstehungsmechanismen von Reibspuren erfolgt in Kapitel 2.2.

¹⁹ Diekel: Unfallspuren auf der Fahrbahn, 2007, S. 541

profilierung des Reifens über der Breite der Aufstandsfläche des Reifens auf der Fahrbahn ab. Neben der Trajektorie des Fahrzeugs lässt sich aus der Länge von Bremsspuren der Bremsweg und somit die Geschwindigkeit des Fahrzeugs zu Spurzeichnungsbeginn berechnen²⁰. Die Identifikation des verursachenden Fahrzeugs kann über die Spurweite aus dem Abstand zweier Bremsspuren erfolgen, falls diese von den Reifen einer Achse stammen. Ebenfalls ist die abgezeichnete Umfangsprofilierung, wie auch schon bei den Fahrspuren, zum Rückschluss auf das Reifenprofil des verursachenden Fahrzeugs verwendbar.

Bremsspuren, die aus Bremsungen mit blockierten Rädern resultieren, werden als **Blockierspuren** bezeichnet. Diese sind im Vergleich zu einer Bremsspur mit nicht blockiertem Rad auf der jeweiligen Fahrbahnoberfläche deutlich intensiver ausgeprägt²¹ und zeichnen ebenfalls das Umfangsprofil des Reifens ab. Der Informationsgehalt von Blockierspuren entspricht daher im Wesentlichen dem von Bremsspuren. Blockierspuren haben mit zunehmender Ausstattungsrate von Fahrzeugen mit Anti-Blockiersystemen im Straßenverkehr stark an Bedeutung für die Unfallrekonstruktion verloren. Lediglich bei der Rekonstruktion von Motorradunfällen sind sie aufgrund der noch niedrigen Ausstattungsrate von Motorädern mit ABS häufiger anzutreffen²².

Aufgrund der über den Umfang inhomogenen Abnutzung und Erhitzung des Reifens bei einer Blockierbremsung kann es im Bereich der Kontaktfläche zur Ansammlung beziehungsweise Haftung von Bindemittel und/oder Reifenabrieb kommen, die im Falle eines Weiterrollens des Reifens nach Ende der Blockierbremsung als dunkle Flecken auf der Fahrbahn haften. Der Abstand zwischen diesen Flecken, auch **Intervall-Spuren** genannt, entspricht typischerweise dem Abrollumfang des Reifens²³. Aus dem Ort des Übergangs von Blockier- in Intervallspuren lässt sich auf die Änderung des Bremsverhaltens des Fahrers schließen.

Bremsspuren, die aus Bremsungen mit aktiver ABS-Regelung stammen, werden auch als **ABS-Spuren** bezeichnet. Die Besonderheit im Vergleich zu Bremsungen ohne ABS-Regeleingriff besteht darin, dass es je nach Regelfrequenz und Reglerabstimmung des verbauten Systems bei einer durchgehenden Spur zu Spurverstärkungen oder einer unterbrochenen Spur mit regelmäßig angeordneten intensiven Spuren kommen kann. Diese Unregelmäßigkeiten werden auch als „Regelflecken“ bezeichnet²⁴. Sie lassen sich auf ein Überspringen des ABS-Reglers um den Schlupf am Reibwertmaximum zurückführen, wodurch die Spur in Überschlupfphasen verstärkt und in Unterschlupfphasen abgeschwächt wird²⁵. Das Vorfinden von Regelflecken lässt darauf schließen, dass der Fahrer so stark gebremst hat, dass die ABS-Regelung aktiviert wurde. Der Umkehr-

²⁰ vgl. Kapitel 2.1.2

²¹ Grandel: Bremsversuche zur Untersuchung der Bremsverzögerung und der Erkennbarkeit von Bremsspuren bei einem Fahrzeug mit Automatischem Blockierverhinderer, 1990

²² Golder: Bremsverzögerungen und Sturzeinleitung von Motorrädern, 2007

²³ www.unfallaufnahme.info, Zugriff am 11.01.2013

²⁴ Halonbrenner: Die Beurteilung von Reifenspuren, 1993, S. 204

²⁵ Bullas: Bituplaning: A Low Dry Friction Phenomenon of New Bituminous Road Surfaces, 2007, S. 274

schluss ist allerdings nicht zulässig, da unter anderem Untersuchungen von Simmermacher²⁶ et al. gezeigt haben, dass bei Fahrzeugen mit modernen ABS-Steuergeräten aufgrund der höheren Regelfrequenz und Regelgüte meist durchgängige und relativ gleichmäßige Bremsspuren ohne sichtbare Regelflecken entstehen.

Bei **Beschleunigungsspuren** handelt es sich analog zu Bremsspuren um Reibspuren, die von antreibenden Rädern hinterlassen werden. Sie ähneln in ihrem Erscheinungsbild Bremsspuren und sind in ihrer Intensität bei hohen Schlupfwerten mit Blockierspuren vergleichbar. Analog zu Bremsspuren lassen sich aus Beschleunigungsspuren theoretisch Informationen bezüglich des Reifenprofils, der Spurweite und der Beschleunigungsstrecke gewinnen. Aufgrund ihres seltenen Auftretens bei Unfallgeschehen, haben sie für die Unfallrekonstruktion allerdings kaum Relevanz²⁷.

Driftspuren sind Reibspuren, die bei kontrollierten Kurvenfahrten aufgrund von Querschlupf mit oder ohne überlagerten Längsschlupf am Reifen entstehen. Dabei kommt es je nach Höhe des überlagerten Längsschlupfs zu schräg zur Spurrichtung verlaufenden Strichen, deren Winkel Auskunft über den resultierenden Schlupfvektor geben kann²⁸. Bei parallel verlaufenden Driftspuren der kurvenäußeren sowie kurveninneren Räder wird von einem konstanten Schwimmwinkel und damit einer kontrollierten Kurvenfahrt ausgegangen²⁹. Da Driftspuren oftmals entstehen, wenn sich ein Fahrzeug an der Kraftschlussgrenze bewegt, kann aus dem Radius der Spuren auf die Kurvengeschwindigkeit geschlossen werden²⁸.

Schleuderspuren entstehen durch eine unkontrollierte Gierbewegung des Fahrzeugs. Ursache dafür kann beispielsweise das Überschreiten der Kraftschlussgrenze bei einer Kurvenfahrt oder einem Ausweichmanöver sein oder eine Kollision mit einem anderen Fahrzeug oder Hindernis. Schleuderspuren sind dadurch gekennzeichnet, dass zwischen den Spuren der Reifen einer Achse kein konstanter Abstand liegt, sondern sich diese je nach Anzahl an Drehungen um die Hochachse kreuzen. Im Falle eines Kontrollverlusts während einer Kurvenfahrt gehen ihnen Driftspuren voraus³⁰. Der Ort des Beginns von Driftspuren beziehungsweise der Ort des Übergangs von Drift- in Schleuderspuren kann daher Aufschluss über den Kollisionsort beziehungsweise den Zeitpunkt des Kontrollverlusts über das Fahrzeug durch den Fahrer geben.

Walkspuren bezeichnen im ursprünglichen Sinne Reibspuren, die durch einen drucklosen Reifen hinterlassen werden. Dabei zeichnen sich insbesondere die Reifenschultern verstärkt auf der Fahrbahn ab, während die Lauffläche nur sehr schwach oder gar nicht zeichnet. Gehen Brems- oder Blockierspuren in Walkspuren über, wird ein kollisionsbe-

²⁶ Simmermacher et al.: Pkw-Reifenspuren unter Einfluss der Regelsysteme ABS und ESP und der Parameter Reifenart und Reifendruck, 2009, S. 167

²⁷ Danner et al.: Technische Analyse von Verkehrsunfällen, 1981, S. 267

²⁸ vgl. Kapitel 2.1.2

²⁹ Diekel: Unfallspuren auf der Fahrbahn, 2007, S. 547 f.

³⁰ Diekel: Unfallspuren auf der Fahrbahn, 2007, S. 549

dingter Reifenschaden angenommen³¹. Sind Bremsspuren hingegen durchgängig in Form einer Walkspur vorhanden, kann dies ein Indiz dafür sein, dass der Reifen schon zu Beginn der Bremsung drucklos war und daher möglicherweise Ursache für den Unfall. Untersuchungen von Simmermacher³² et al. haben allerdings gezeigt, dass auch druckverminderte Reifen beziehungsweise Reifen mit Notlaufeigenschaften bei Standardluftdruck Reifenspuren mit verstärkten Kantenzeichnungen hinterlassen.

Spurstörungen sind im Gegensatz zu den übrigen Spurenarten keine unabhängig auftretende Erscheinungsform, sondern bezeichnen allgemein Unregelmäßigkeiten, die bei den anderen Spurarten auftreten. Typische Spurstörungen sind Knicke, Verstärkungen, Unterbrechungen oder Verwellungen³³. Spurenknicke entstehen, wenn aufgrund einer Kollision eine schlagartige Richtungsänderung des Unfallfahrzeugs eintritt. Aus dem Ort des Spurenknicks kann auf den Kollisionsort geschlossen und mit Hilfe des Impulssatzes, der Beschädigungen an den Fahrzeugen und der Fahrzeugmassen der Kollisionswinkel der beteiligten Fahrzeuge aus der Richtungsänderung abgeschätzt werden. Spurverstärkungen werden entweder mit Schlupferhöhungen (vgl. „Regelflecken“ bei ABS-Spuren) oder Radlasterhöhungen begründet. Letzteres kann entweder durch Fahrbahnunebenheiten hervorgerufen werden oder durch eine zusätzliche äußere Kraft, zum Beispiel den Aufprall einer Person oder eines leichteren Fahrzeugs auf der Motorhaube. Die Stelle der Spurverstärkung kann dann Auskunft über den Kollisionsort geben. Als Folge einer Kollision kann es auch zu einer Entlastung der Räder kommen, dies wirkt sich dann als Unterbrechung der Spur aus und kann ebenfalls auf den Kollisionsort schließen lassen. Schwingungen des Rades aufgrund einer direkten Kollision oder Defekte an der Radaufhängung können sich in einer wellenförmigen Spurausprägung äußern.

Radierspuren stellen eine unabhängige Klasse von Reifenspuren dar. Sie entstehen nicht durch die eigentliche Fahrbewegung des Fahrzeugs, sondern kollisionsbedingt durch das stark beschleunigte Wegschieben des Fahrzeugs. Radierspuren können daher Auskunft über die Stellung der Fahrzeuge zum Kollisionszeitpunkt und die Kollisionsenergie geben³³.

2.1.2 Rückschlüsse auf fahrdynamische Parameter aus Reifenspuren

Reifenspuren, die Rückschlüsse auf die Bewegung des Fahrzeugs und somit auf fahrdynamische Größen erlauben, sind im Wesentlichen Beschleunigungs-, Brems- und Drift-

³¹ Grandel et al.: Fahrzeugverhalten und Spurzeichnung beim Bremsen mit Antiblockiersystem und unfallbedingtem plötzlichem Reifendruckverlust, 1985

³² Simmermacher et al.: Pkw-Reifenspuren unter Einfluss der Regelsysteme ABS und ESP und der Parameter Reifenart und Reifendruck, 2009, S. 169 ff.

³³ www.unfallaufnahme.info, Zugriff am 11.01.2013

spuren. Aufgrund des eher seltenen Auftretens von Beschleunigungsspuren an Unfallstellen wird sich im Folgenden auf Brems- und Driftspuren konzentriert.

Eine wesentliche Größe für die Betrachtung des Unfallhergangs, insbesondere in der Phase vor der Kollision, ist die Ausgangsgeschwindigkeit der beteiligten Fahrzeuge. Auf Basis von Bremsspuren kann unter bestimmten Umständen auf die Bremsausgangsgeschwindigkeit, und auf Basis von Driftspuren auf die Kurvengeschwindigkeit geschlossen werden.

Bremsausgangsgeschwindigkeit aus Bremsspuren

Unter der Annahme, dass ein Teil der kinetische Energie E_{kin} des Fahrzeugs bei einer Geradeausbremsung (d.h. keine Rotation des Fahrzeugs um die Hochachse) unter Vernachlässigung der Fahrwiderstände durch die Bremskraft in Form von Reibarbeit W_R dissipiert wird, ergibt sich die in Gleichung (2.1) aufgestellte Energiebilanz zwischen dem Zeitpunkt t_0 zu Beginn der Bremsung und dem Zeitpunkt t_c der Kollision.

$$E_{kin}(t_0) = E_{kin}(t_c) + W_R(t_c) \quad (2.1)$$

Darin gelten für die kinetische Energie E_{kin} und die Reibarbeit W_R die in Gleichung (2.2) und (2.3) angegebenen Beziehungen. Darin ist m die Fahrzeugmasse, v die Schwerpunktgeschwindigkeit des Fahrzeugs, F_B die Bremskraft, x die Fahrzeugkoordinate in Fahrzeugbewegungsrichtung und s_B der Bremsweg, mit $s_B = x(t_c) - x(t_0)$.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2.2)$$

$$W_R = \int_{x(t_0)}^{x(t_c)} F_B dx = F_B \cdot s_B \quad (2.3)$$

Mit der Beziehung $F_B = m \cdot \ddot{x}_B$ für die Bremskraft unter Annahme einer konstanten Bremsverzögerung \ddot{x}_B ergibt sich durch Einsetzen von (2.2) und (2.3) in Gleichung (2.1) die in (2.4) dargestellte Energiebilanz.

$$\frac{1}{2} m \cdot v(t_0)^2 = \frac{1}{2} m \cdot v(t_c)^2 + m \cdot \ddot{x}_B \cdot s_B \quad (2.4)$$

Unter der Annahme, dass der Reifen während des Bremsvorgangs unter voller Ausnutzung seines Kraftschlusspotenzials eine Reifenspur zeichnet, wird der Bremsweg s_B der gemessenen Länge l_B der vorgefundenen Bremsspur gleichgesetzt. Die Ausgangsgeschwindigkeit zu Beginn der Spurzeichnung berechnet sich somit durch Umstellen von (2.4) gemäß Gleichung (2.5)

$$v(t_0) = \sqrt{v(t_c)^2 + 2 \cdot \ddot{x}_B \cdot l_B} \quad (2.5)$$

Wurde bei einem Unfall die Geschwindigkeit vollständig durch die Bremsung abgebaut (zum Beispiel bei der Kollision mit einem Fußgänger) und nicht zusätzlich durch die

Verformung des Fahrzeugs, wird die Kollisionsgeschwindigkeit vernachlässigt und Gleichung (2.5) vereinfacht sich zu (2.6)³⁴.

$$v(t_0) = \sqrt{2 \cdot \ddot{x}_B \cdot l_B} \quad (2.6)$$

Andernfalls können die kinetische Energie und damit die Geschwindigkeit bei der Kollision aus den Deformationen der Fahrzeuge beispielsweise mittels EES-Methode³⁵ (Energy Equivalent Speed) berechnet werden. Als Wert für die Verzögerung wird die mittlere Vollverzögerung des Fahrzeugs angenommen. Diese wird entweder experimentell mit dem Unfallwagen oder einem vergleichbaren Fahrzeug am Unfallort bestimmt oder Tabellen aus der Fachliteratur entnommen³⁶.

In verschiedenen Untersuchungen^{37,38,39,40}, in denen die berechnete Geschwindigkeit nach Gleichung (2.6) mit der gemessenen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt der Bremspedalbetätigung verglichen wurde, haben gezeigt, dass diese deutlich unter der gemessenen Geschwindigkeit liegt, da die Schwellzeit des Bremssystems nicht berücksichtigt wird. Der Unterschied zwischen der Geschwindigkeit bei Bremspedalbetätigung $v(t_0)$ und der Geschwindigkeit $v(t_I)$ zu dem Zeitpunkt, zu dem die maximale Verzögerung aufgebaut ist, ist grafisch in einem idealisierten Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf in Abbildung 2.2 dargestellt⁴¹. Die Zeitpunkte t_0 und t_I liegen um die Dauer der Schwellzeit t_s auseinander. Wird angenommen, dass Bremspuren während der Bremsung mit maximaler Verzögerung entstehen, so entspricht die Länge der Spuren l_B dem während dieser Zeit zurückgelegten Bremsweg, in der Abbildung als graue Fläche unter der Geschwindigkeitskurve dargestellt.

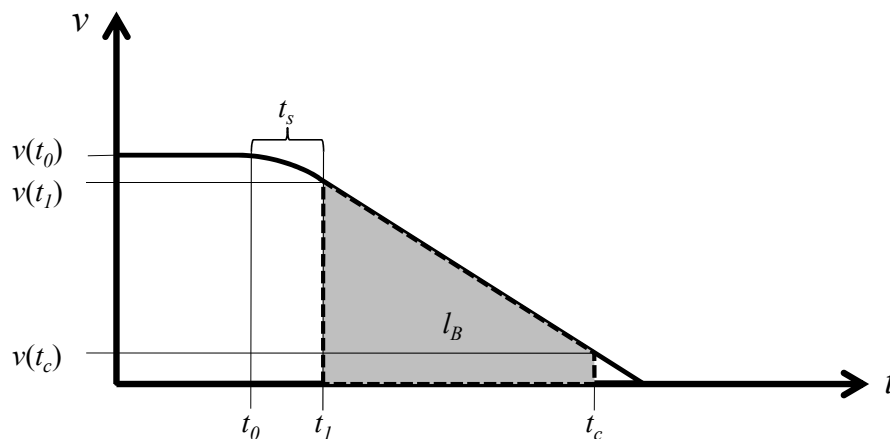


Abbildung 2.2: Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf eines idealisierten Anhaltevorgangs.

³⁴ Danner et al.: Technische Analyse von Verkehrsunfällen, 1981, S. 158

³⁵ Mc Henry et al.: Mathematical Reconstruction of Highway Accidents, 1973

³⁶ Knödseder et al.: Experimentelle Ermittlung zeitgemäßer mittlerer Bremsvollverzögerungen von Personenkraftwagen, 2008

³⁷ Schimmelpfennig: Geschwindigkeitsrückrechnung nach Spurenbild/Achskoppelverfahren, 1984

³⁸ Reed et al.: A Comparison of Automobile and Truck Decelerations During Emergency Braking, 1987

³⁹ Neptune et al.: Speed from skids: A modern approach, 1995

⁴⁰ Overgaard et al.: Relationships Between Pre-Skidding and Pre-Braking Speed, 2001, S. 265

⁴¹ vgl. Winner: Kraftfahrzeugtechnik, 2012, S. 404, nach Bussien: Automobiltechnisches Handbuch, 1965

Bei einem angenommenen linearen Anstieg der Bremsverzögerung innerhalb der Schwellzeit ergibt sich die Differenz zwischen $v(t_0)$ und $v(t_1)$ gemäß Gleichung (2.7)

$$v(t_0) - v(t_1) = \frac{\ddot{x}_B}{2} t_s \quad (2.7)$$

In diversen Quellen, beispielsweise von Danner und Halm⁴² oder Neptune et al.⁴³, wird daher die Schwellzeit bei der Berechnung der Ausgangsgeschwindigkeit gemäß Gleichung (2.8) durch Ergänzung der Geschwindigkeitsdifferenz nach (2.7) in (2.5) berücksichtigt

$$v(t_0) = \sqrt{v(t_c)^2 + 2 \cdot \ddot{x}_B \cdot l_B} + \frac{\ddot{x}_B}{2} t_s \quad (2.8)$$

Die Strecke, die das Fahrzeug zu Beginn der Bremsung während der Schwellzeit zurücklegt, wird aufgrund der fehlenden Reifenspuren auch als „unsichtbarer Bremsweg“ bezeichnet⁴⁴. Bei der Betrachtung der möglichen Fehlerquellen auf das Ergebnis der Geschwindigkeitsrückrechnung nach Gleichung (2.8) wird der Einfluss der sichtbarkeitsabhängigen Messung der Bremsweglänge deutlich größer eingeschätzt als Abweichungen bei den angenommenen Verzögerungs- und Schwellzeitwerten⁴⁵.

Kurvengeschwindigkeit aus Driftspuren

Für die Rückrechnung der Kurvengeschwindigkeit auf Basis von Driftspuren wird das Fahrzeug als Massepunkt angenommen, der sich gleichförmig auf einer Kreisbahn bewegt. In diesem Zustand wird die Zentrifugalkraft durch die Kräfte an den Fahrzeugreifen abgestützt. Die von den Reifen übertragene Querbesehleunigung a_y des Fahrzeugs, als Produkt der Erdbesehleunigung g und des Reifenreibwerts μ_y in Querrichtung, ergibt sich somit als Zentripetalbesehleunigung der Punktmasse mit der Kurvengeschwindigkeit v auf einer Kreisbahn des Radius r .

$$a_y = \mu_y \cdot g = \frac{v^2}{r} \quad (2.9)$$

Unter der Annahme, dass Driftspuren bei Kurvenfahrten an der Kraftschlussgrenze auftreten, wird bei der Unfallrekonstruktion die kritische Kurvengeschwindigkeit v_{krit} aus dem gemessenen Radius r der vorgefundenen Driftspuren und der maximal übertragbaren Querbesehleunigung, beziehungsweise dem maximalen Reibbeiwert $\mu_{y,max}$ nach Gleichung (2.10) berechnet⁴⁶.

$$v_{krit} = \sqrt{\mu_{y,max} \cdot g \cdot r} \quad (2.10)$$

⁴² Danner et al.: Technische Analyse von Verkehrsunfällen, 1981, S.158

⁴³ Neptune et al.: Speed from skids: A modern approach, 1995

⁴⁴ Burg: Spurenzeichnung und Bremsverzögerung bei Notbremsungen mit Personenkraftwagen mit und ohne automatischem Blockierverhinderer, 1980

⁴⁵ Brach et al.: Comparison of Tire Friction Test Methodologies Used in Accident Reconstruction, 1998, S. 246

⁴⁶ Dickerson et al.: Evaluation of Vehicle Velocity Predictions Using the Critical Speed Formula, 1995

Die Werte für die maximale Querbeschleunigung werden analog zur Geschwindigkeitsrückrechnung auf Basis von Bremsspuren experimentell am Unfallort ermittelt oder Tabellen entnommen. Voraussetzungen für die Anwendbarkeit von Gleichung (2.10), die im englischen Sprachraum auch als „Critical Speed Formula“ (CSF) bezeichnet wird, sind nach Brach⁴⁷, dass das Fahrzeug während der Kurvenfahrt nicht beschleunigt oder gebremst hat und der Radius der Kreisbahn beziehungsweise der Driftspuren annähernd konstant ist. Falls sich der Radius über den Verlauf der Spur ändert, wird empfohlen, den Radius zu Beginn der Spur zu messen, um Rechenfehler zu minimieren. Bezüglich der Annahme der kraftschlussbedingten maximalen Kurvengeschwindigkeit räumt Marks⁴⁸ ein, dass insbesondere bei schweren Fahrzeugen auch deutlich unterhalb der kritischen Kurvengeschwindigkeit beziehungsweise dem maximalen Kraftschlussbeiwert Driftspuren entstehen können. Dabei zeichnen die kurvenäußeren Räder in der Regel stärker als die kurveninneren.

Ist von einer zusätzlichen Bremsung in der Kurve auszugehen, so ist die Aufteilung des zur Verfügung stehenden Kraftschlusspotentials am Reifen in Längs- und Querkraften nach dem Kammschen Kreis zu beachten, welche sich aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Querkraft bei einer Kurvenbremsung mit konstantem Kurvenradius über dem Fahrweg ändert. Die Herleitung einer entsprechenden Formel, die die Ansätze der Geschwindigkeitsrückrechnung auf Basis von Brems- und Driftspuren vereint, ist zum Beispiel bei Schimmelpfennig et al.⁴⁹ zu finden

Bestimmung des resultierenden Schlupfvektors aus Drift- und Schleuderspuren

Aufgrund der erwähnten Einschränkungen hinsichtlich der Anwendung der CSF-Methode zur Bestimmung der Kurvengeschwindigkeit ist es wichtig zu wissen, ob bei einer Kurvenfahrt eine zusätzliche Beschleunigung oder Abbremsung des Fahrzeugs stattgefunden hat. Darüber kann die häufig bei Driftspuren und Schleuderspuren zu beobachtende Maserung innerhalb der Spuren Auskunft geben. Dabei wird angenommen, dass aufgrund der höheren Belastung der kurvenäußeren Reifenschultern bei einer Kurvenfahrt mit hoher Querbeschleunigung die Profilblöcke in diesem Schulterbereich stärker zeichnen und dabei Striche in Richtung des Querschlupfs hinterlassen. Bei zusätzlicher Überlagerung eines Längsschlupfs am Reifen nimmt der Winkel der Maserung je nach Richtung des Längsschlupfs zu. Dies zeigt Abbildung 2.3. Dargestellt ist die ebene Ansicht typischer Reifenspurzeichnungen mit dem charakteristischen Maserungsverlauf: Bremsspur (a), Driftspur (b), Schleuderspur bei komplett gedrehtem Fahrzeug (c) und in Bremsspur übergehende Driftspur (d).

⁴⁷ Brach: An Analytical Assessment of the Critical Speed Formula, 1997

⁴⁸ Marks: Pavement Skid Resistance Measurement and Analysis in the Forensic Context, 2005, S. 5

⁴⁹ Schimmelpfennig et al.: Geschwindigkeitsrückrechnung auf der Basis von ABV-Spuren in Kurven/ABV- Kurvenspurgleichung, 1986

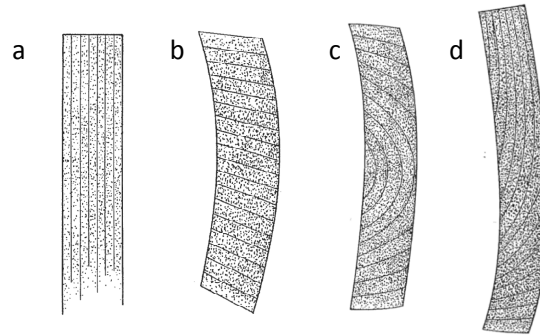


Abbildung 2.3: Ebene Ansicht typischer Reifenspurzeichnungen mit charakteristischer Maserung⁵⁰.

Hinsichtlich des konkreten Zusammenhangs zwischen der Höhe des Winkels der Maserung zur Spurtangente und dem Schlupfzustand des Reifens finden sich in der Literatur zwei unterschiedliche Annahmen. Die eine ist, dass der Winkel der Maserung dem Winkel β des resultierenden Schlupfvektors entspricht. Dieser ist nach Gleichung (2.11) definiert als der Winkel zwischen den Vektoren des Längsschlupfs λ und des Querschlupfs $\sin \alpha$ am Reifen.

$$\beta = \arctan\left(\frac{\sin \alpha}{\lambda}\right) \quad (2.11)$$

Unter reinem Querschlupf müssten Driftspuren daher eine Maserung zeigen, deren Winkel zur Spurtangente 90° beträgt⁵¹. Die andere Annahme ist, dass der Winkel der Maserung die Summe aus dem resultierenden Schlupfwinkel β und dem Schräglaufwinkel α ist, da die Radmittelebene um den Schräglaufwinkel α gedreht zur Spurtangente steht und davon ausgegangen wird, dass die Reifenschulter unter reinem Querschlupf senkrecht zur Radmittelebene zeichnet. Dies ist prinzipiell in Abbildung 2.4 dargestellt.

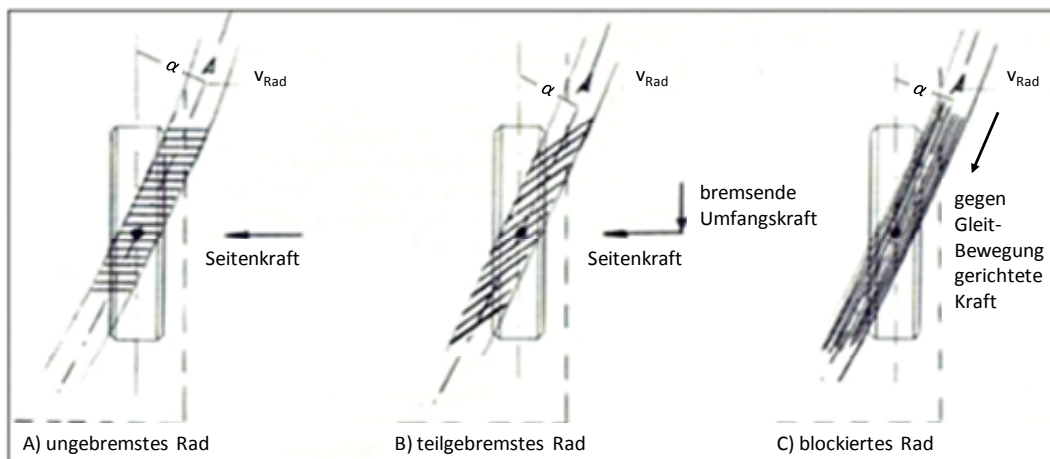


Abbildung 2.4: Prinzipieller Zusammenhang des Maserungswinkels in Driftspuren und dem Schlupfzustand am Reifen⁵²

⁵⁰ Reveley et al.: A Comparison Study of Skid and Yaw Marks, 1989, S. 31 ff.

⁵¹ Diekel: Unfallspuren auf der Fahrbahn, 2007, S. 548

⁵² Danner et al.: Technische Analyse von Verkehrsunfällen, 1981, S. 45

Untersuchungen von Simmermacher et al.⁵³, bei denen der Winkel der Maserung mit dem gemessenen Schräglaufwinkel und Längsschlupfwerten verglichen wurde, unterstützen die Hypothese, dass der Maserungswinkel der Summe von Schräglauf- und resultierendem Schlupfwinkel entspricht. Aufgrund der Abhängigkeit der Maserung von zwei Winkeln, lässt alleine die Betrachtung einer Driftspur nicht den Rückschluss auf den konkreten Schlupfzustand am Reifen zu. Beauchamp et al.⁵⁴ stellen eine Methode vor, wie der Schräglaufwinkel und Längsschlupf unter Kenntnis der Profilblockabstände TD an der Reifenschulter des zeichnenden Rades, des Abstandes SD der Maserung in der Spur und des Maserungswinkels θ zur Spurtangente ermittelt werden kann. Die dem Modell zugrundeliegenden trigonometrischen Beziehungen sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

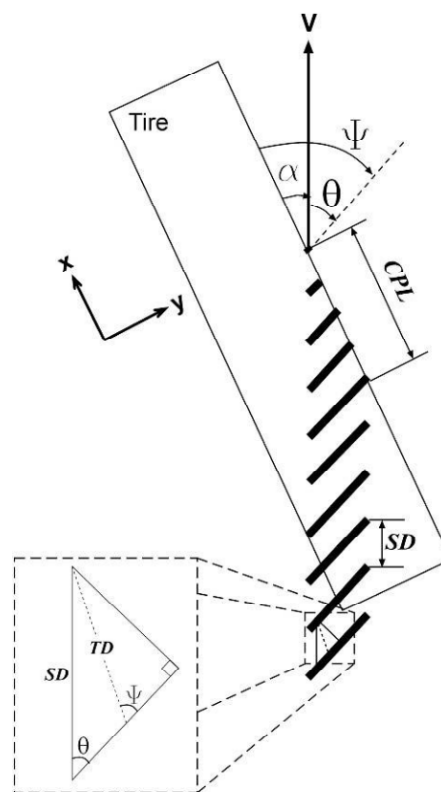


Abbildung 2.5: Geometrische Herleitung des Zusammenhangs zwischen Maserungswinkel θ , Schräglaufwinkel α , Profilblockabstand TD und Maserungsabstand SD ⁵⁵.

Aus der Beziehung der Größen im Modell leiten sich die Formeln (2.12) für den Schräglaufwinkel und (2.13) für den Längsschlupf ab.

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{SD \cdot \sin \theta}{TD}\right) - \theta \quad (2.12)$$

⁵³ Simmermacher et al.: Pkw-Drift und -Schleuderspuren unter Einfluss der Regelsysteme ABS und ESP und der Parameter Reifenart und Reifendruck, 2009

⁵⁴ Beauchamp et al.: Determining Vehicle Steering and Braking from Yaw Mark Striations, 2009

⁵⁵ Beauchamp et al.: Determining Vehicle Steering and Braking from Yaw Mark Striations, 2009, S. 3

$$\lambda = \frac{\tan \alpha}{\tan(\theta + \alpha)} \quad (2.13)$$

Ein anderer Mechanismus, der selbst bei unprofilierten Reifen zur Ausbildung einer Maserung bei Kurvenfahrten führen kann, wurde von Yamazaki und Akasaka⁵⁶ untersucht. Dabei wurde die beobachtete Maserung auf die Ausbildung eines querorientierten Beulmusters im Reifenlatsch aufgrund des wirkenden Spannungszustandes zurückgeführt. Dies ist prinzipiell in Abbildung 2.6 dargestellt.

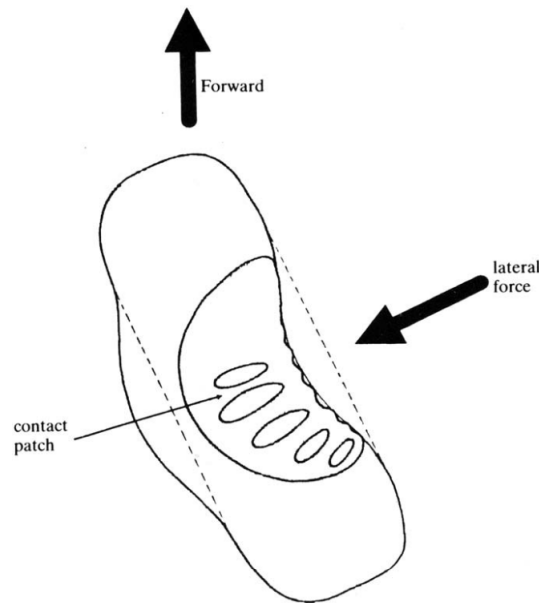


Abbildung 2.6: Beulen des Reifenlatschs unter Querkraft⁵⁷

2.1.3 Bewertung der Sichtbarkeit von Reifenspuren

Die in Kapitel 2.1.2 vorgestellten Verfahren setzen voraus, dass Reifenspuren auf der Fahrbahn vorhanden und in einem Maße sichtbar sind, dass objektive Merkmale, zum Beispiel Breite, Abstand, Radius, Länge oder Maserungswinkel gemessen werden können. Dabei ist es grundsätzlich wichtig, das Vorhandensein einer Spur und deren Sichtbarkeit voneinander zu trennen, auch wenn die subjektive Beurteilung des Vorhandenseins einer Spur an deren Sichtbarkeit gebunden ist. Als wesentliche Eigenschaft einer Spur für deren Erkennbarkeit wird in diesem Zusammenhang die Intensität beschrieben⁵⁸. Diese Größe ist in der Literatur jedoch nicht näher definiert und wird je nach Verständnis subjektiv bewertet.

⁵⁶ Yamazaki et al.: Buckling Behavior in Contact Area of Radial Tire Structure and Skid Marks Left by Tires, 1988

⁵⁷ Lambourn: The calculation of motor car speeds from curved tyre marks, 1989, S. 375

⁵⁸ Grandel: Bremsversuche zur Untersuchung der Bremsverzögerung und der Erkennbarkeit von Brems Spuren bei einem Fahrzeug mit Automatischem Blockiervorhinderer, 1989, S. 343

Quantifizierung der Intensität

Eine bekannte Quelle, welche sich mit der Quantifizierung der Reifenspurintensität beschäftigt, geht auf Grandel^{59,60} zurück. Dabei wird zur Beurteilung von ABS-Spuren anhand einer Spurintensitätsskala die Erkennbarkeit subjektiv bewertet. Als Bewertungskriterium dient dabei die Ausprägung der definierten Spurmerkmale:

- Spurzeichnung: „Bremsspurzeichnung entlang des Bremsweges“
- Kantenspur: „Ausgeprägte Spurzeichnung der Kanten des Reifens“
- Füllung: „Spurzeichnung zwischen den Kanten des Reifens“
- Intervallspur: „Entlang des Bremsweges unterbrochene Spurzeichnung desselben Reifens“⁶⁰

Die daraus abgeleitete Skala (vgl. Tabelle 2.1) ist in elf Stufen von 0 % bis 100 % unterteilt.

Tabelle 2.1: Spurintensitätsskala nach Grandel⁶¹

Stufe	Merkmal
100 %	Spurzeichnung ununterbrochen, Kantenspur nicht von Füllung unterscheidbar, Kantenspur und Füllung sehr stark ausgeprägt
90 %	Spurzeichnung ununterbrochen, Kantenspur nicht oder kaum von Füllung unterscheidbar, Füllung stark ausgeprägt
80 %	Spurzeichnung ununterbrochen, Kantenspur deutlich hervorgehoben, Füllung ausgeprägt
70 %	Spurzeichnung ununterbrochen, Kantenspur deutlich hervorgehoben. Füllung mäßig ausgeprägt
60 %	Spurzeichnung ununterbrochen, Kantenspur hervorgehoben bis unvollständig, Füllung schwach ausgeprägt
50 %	Spurzeichnung ununterbrochen und mäßig ausgeprägt, Kantenspur- und/oder Intervallspurstücke unterstützen die Erkennbarkeit
40 %	Spurzeichnung ununterbrochen und schwach ausgeprägt. Kantenspur- und/oder Intervallspurstücke unterstützen die Erkennbarkeit.
30 %	Spurzeichnung ununterbrochen und schwach ausgeprägt, ohne die Erkennbarkeit unterstützende Spurfragmente.
20 %	Spurzeichnung unvollständig, deutlich erkennbare Kantenspur- und/oder Intervallspurstücke
10 %	Spurzeichnung unvollständig und/oder sehr schwach ausgeprägt, ohne die Erkennbarkeit unterstützende Spurfragmente
0 %	Keine Spur erkennbar

Bei der Bewertung von Reifenspuren aus Fahrversuchen mittels der Spurenintensitätsskala wurden Reifenspuren der Stufe 40 % bis 100 % als „sicher erkennbar“, Reifenspu-

⁵⁹ Grandel: Bremsversuche zur Untersuchung der Bremsverzögerung und der Erkennbarkeit von Brems Spuren bei einem Fahrzeug mit Automatischem Blockierverhinderer, 1989, S. 343

⁶⁰ Ahlgrimm et al.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 2, 1997, S. 135

⁶¹ Grandel: Bremsversuche zur Untersuchung der Bremsverzögerung und der Erkennbarkeit von Brems Spuren bei einem Fahrzeug mit Automatischem Blockierverhinderer, 1989, S. 344

ren der Stufen 20 und 30 % unter „günstigen Verhältnissen“ erkennbar, und Spuren der Stufen 0 und 10 % als „in der Praxis nicht erkennbar“ beurteilt⁶².

Da die Intensitätsbewertung in diesem Fall subjektiv erfolgt, unterliegt die Höhe der bewerteten Intensität entsprechenden Einflussfaktoren auf die Sichtbarkeit. Zur Systematisierung der bekannten Einflussfaktoren wird im Folgenden angenommen, dass die Intensität durch objektiv messbare Eigenschaften charakterisiert werden kann. Demnach werden die Einflussfaktoren nach tatsächlicher und beobachteter Intensität (Sichtbarkeit) unterschieden.

Einflüsse auf die tatsächliche Intensität

Als Einflüsse auf die tatsächliche Intensität werden in dieser Arbeit Faktoren verstanden, die bei konstanten Beobachtungsbedingungen zu Änderungen der Sichtbarkeit führen und mit der Entstehung von Reifenspuren zusammenhängen. Auf diese, durch den Beobachter nicht beeinflussbare Faktoren wird nochmals in Kapitel 2.2 näher eingegangen.

Einen häufig genannten Einflussfaktor stellt die **Fahrbahn** dar, wobei in der Regel zwischen Beton- und Asphaltbeton unterschieden wird^{63,64,65,66}. Im Vergleich zu Betonfahrbahnen werden auf Asphaltbeton deutlich höhere maximale Intensitäten erreicht, während die Kontrastverhältnisse bei schwachen Spuren auf Betonfahrbahnen besser sind⁶⁷. Der Bindemittel- beziehungsweise Bitumengehalt in der Oberfläche von Asphaltfahrbahnen wirkt sich demnach spurverstärkend aus. So werden beispielsweise bei Reifenspuren auf frischen, und damit bindemittelreichen Asphaltdeckschichten beziehungsweise Flickstellen noch höhere Intensitäten beobachtet als auf älteren Asphaltfahrbahnen⁶⁸.

Bei gleicher Fahrbahn und gleichem Fahrmanöver (Vollbremsung) haben Simmermacher et al.⁶⁹ auch im Vergleich verschiedener **Reifen** Intensitätsunterschiede feststellen können. Bei den drei untersuchten Reifensätzen zeichnete der verwendete Winterreifensatz intensiver als die beiden Sommerreifensätze (mit und ohne Notlaufeigenschaften), wobei die Spuren der Reifen mit Notlaufeigenschaften am undeutlichsten zu erkennen waren.

⁶² Ahlgrimm et al.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 2, 1997, S. 137

⁶³ Danner et al.: Technische Analyse von Verkehrsunfällen, 1981, S. - 163

⁶⁴ Grandel: Bremsversuche zur Untersuchung der Bremsverzögerung und der Erkennbarkeit von Brems Spuren bei einem Fahrzeug mit Automatischem Blockierverhinderer, 1990, S. 12 f.

⁶⁵ Ahlgrimm et al.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 1, 1997

⁶⁶ Diekel: Unfallspuren auf der Fahrbahn, 2007, S. 541

⁶⁷ Ahlgrimm et al.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 1, 1997, S. 70

⁶⁸ vgl. Kapitel 2.2.2

⁶⁹ Simmermacher et al.: Pkw-Reifenspuren unter Einfluss der Regelsysteme ABS und ESP und der Parameter Reifenart und Reifendruck, 2009, S. 167

Wie bereits bei der Entstehung von Regelflecken beziehungsweise Spurstörungen erläutert, lässt sich ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Intensität und der Höhe des **Reifenschlupfs** beziehungsweise der **Radlast** (bei konstantem Schlupf ungleich Null) erkennen⁷⁰.

Hinsichtlich des **Temperatur**-Einflusses finden sich in der Literatur kontroverse Aussagen. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass hohe Reibtemperaturen im Latsch zu höherem Reifenabrieb sowie speziell bei Asphaltfahrbahnen zu spurverstärkenden Mechanismen durch das Bitumen und somit höheren Intensitäten führen⁶⁸. In einer Untersuchung von Ahlgrimm und Grandel⁷¹, bei der ein Nachlassen der Spurintensität nach 60 bis 70 m Bremsweg bei Vollbremsungen aus 160 km/h beobachtet wurde, wird dies hingegen damit erklärt, dass bei sehr hohen Temperaturen in der Kontaktfläche besonders große Verschleißpartikel entstehen würden, die nicht an der Fahrbahn haften.

Eine Abnahme der Intensität kann auch mit zunehmender Dauer nach Entstehung der Reifenspür, also dem **Alter der Spur**, beobachtet werden. Dies wird zum einen durch das „Verwehen“ von Abriebpartikeln begründet und zum anderen durch das Haften der Partikel an den Reifen anderer Fahrzeuge, die über die Spur fahren.⁷² Die Abnahme der Intensität ist daher von der Windstärke und dem Verkehrsaufkommen an der Unfallstelle abhängig⁷³, weshalb generell eine möglichst frühzeitige Dokumentation der Unfallsuren empfohlen wird⁷⁴.

Einflüsse auf die beobachtete Intensität (Sichtbarkeit)

Als Einflussfaktoren auf die subjektiv wahrgenommene Sichtbarkeit werden analog zu den vorher genannten Einflussfaktoren solche verstanden, die bei konstanter tatsächlicher Intensität zu Änderungen der Sichtbarkeit führen. Auch hier seien nachfolgend die bekanntesten Einflussfaktoren beispielhaft aufgeführt.

In verschiedenen Quellen, beispielsweise bei Ahlgrimm und Grandel⁷⁵ oder Diekel⁷⁶, wird die Wahl der **Blickrichtung** sowie des **Blickwinkels** beziehungsweise der **Blickhöhe** als besonders wichtig für die Erkennbarkeit von schwachen Reifenspuren genannt. Dabei wird empfohlen, die Reifenspür in einem möglichst flachen Winkel und in Fahrtrichtung zu betrachten, beziehungsweise bei unklarer Fahrtrichtung entsprechend aus jeweils entgegengesetzten Richtungen⁷⁷. Bei seitlicher oder annähernd senkrechter

⁷⁰ vgl. Kapitel 2.1.1

⁷¹ Ahlgrimm et al.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 2, 1997

⁷² Ahlgrimm et al.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 1, 1997, S. 70

⁷³ Metz et al.: Skidmark Signatures of Abs-Equipped Passenger Cars, 1990, S. 110

⁷⁴ Burg et al.: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, 2007, S. 29

⁷⁵ Ahlgrimm et al.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 3, 1997, S. 231

⁷⁶ Diekel: Unfallspuren auf der Fahrbahn, 2007, S. 541 f.

⁷⁷ Halonbrenner: Die Beurteilung von Reifenspuren, 1993, S. 205

Betrachtung der Spur von oben sei die Erkennbarkeit hingegen sehr schlecht oder gar nicht gegeben⁷⁸. Begründet wird dies mit der Annahme, dass die Reifenverschleißpartikel in Fahrtrichtung an der Vorderseite der Rauigkeitsspitzen der Fahrbahnoberfläche haften⁷⁹, wie in Abbildung 2.7 dargestellt.

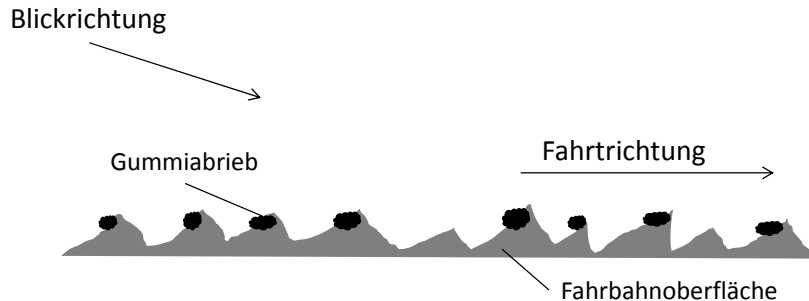


Abbildung 2.7: Haftung der Verschleißpartikel an der Fahrbahnoberfläche⁸⁰

Einen weiteren bekannten Einfluss auf die Sichtbarkeit einer Spur, stellen die **Beleuchtungsbedingungen** dar. Ahlgrimm und Grandel⁸¹ erwähnen in diesem Zusammenhang beispielsweise eine Erhöhung der Sichtbarkeit bei bestimmtem Sonnenstand und bei Metz und Ruhl⁸² wird von einer besseren Erkennbarkeit der Spuren bei leicht bewölktem Himmel, also diffusem Licht, im Vergleich zu direkter Sonneneinstrahlung berichtet.

Maßnahmen zur Erhöhung der Sichtbarkeit

Neben der unmittelbaren Betrachtung der Reifenspur unter Berücksichtigung der als optimal angenommenen Beobachtungsposition und Beleuchtungsverhältnisse (auf die in der Regel kein Einfluss genommen wird) sind aus der Literatur auch noch optische Hilfsmittel bekannt, welche zur Erhöhung der Sichtbarkeit am Unfallort beziehungsweise auch beim Fotografieren führen. So wird beispielsweise bei Burg und Rau⁸³, Metz und Ruhl⁸² oder Ahlgrimm und Grandel⁸¹ von einer erhöhten Sichtbarkeit der Spuren bei Betrachtung durch ein Teleobjektiv berichtet, was mit einer perspektivischen Verkürzung begründet wird.

⁷⁸ Ahlgrimm et al.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 1, 1997, S. 70

⁷⁹ Burg et al.: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, 2007, S. 29

⁸⁰ nach Ahlgrimm et al.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 3, 1997, S. 231

⁸¹ Ahlgrimm et al.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 3, 1997

⁸² Metz et al.: Skidmark Signatures of Abs-Equipped Passenger Cars, 1990

⁸³ Burg: Spurenzeichnung und Bremsverzögerung bei Notbremsungen mit Personenkraftwagen mit und ohne automatischem Blockiervorhinderer, 1980

Da es insbesondere bei direkter Sonneneinstrahlung zu Reflektionen auf der Fahrbahn kommt, wird außerdem der Einsatz eines Polarisationsfilters auf dem Kameraobjektiv beziehungsweise die Betrachtung der Spuren durch eine polarisierende Sonnenbrille⁸⁴ empfohlen. Ein weiteres Hilfsmittel, das die optischen Eigenschaften eines Teleobjektivs und eines Polarisationsfilters vereint, sind Spurenerkennungsgläser der Firma Rettinger, auch als „Rettinger Glas“ bezeichnet. Dabei handelt es sich um ein Fernglas, vor dem zwei gegeneinander verdrehbare Polarisationsfilter angebracht sind⁸⁵.

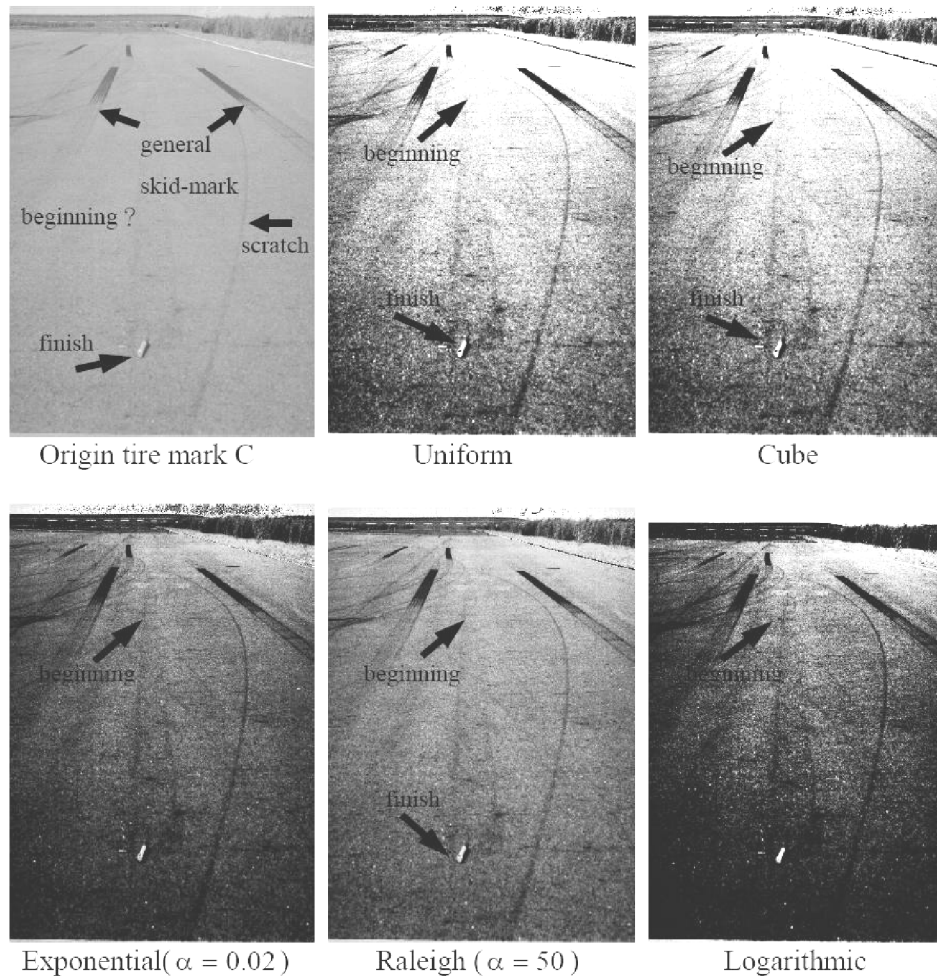


Abbildung 2.8: Ergebnis und Vergleich der Bildbearbeitungsalgorithmen⁸⁶.

Ein anderer Ansatz zur Erhöhung der Sichtbarkeit von Blockierspuren wird in einer Untersuchung von Wang et al.⁸⁷ verfolgt und basiert auf der Bildnachbearbeitung. Dabei wurden Fotos der Reifenspuren aus Entfernungen von 3 - 5 m und Winkeln von 15 – 30 ° entgegen der Fahrtrichtung aufgenommen und mit fünf unterschiedlichen Algorithmen bearbeitet. Diese transformieren das Histogramm, das heißt die Häufigkeitsver-

⁸⁴ Metz et al.: Skidmark Signatures of Abs-Equipped Passenger Cars, 1990

⁸⁵ Danner et al.: Technische Analyse von Verkehrsunfällen, 1981, S. 163

⁸⁶ Wang et al.: Skidmark Patterns and Identification of ABS-Equipped Passenger Car, 2005, S. 3411

⁸⁷ Wang et al.: Skidmark Patterns and Identification of ABS-Equipped Passenger Car, 2005

teilung der Grauwerte, im Originalbild entsprechend einer vorgegebenen Verteilungsfunktion, um eine Kontrasterhöhung der Reifenspuren auf den Bildern zu erreichen. Als Verteilungsfunktionen wurde eine Gleich- („Uniform“), eine Kubikwurzel- („Cube Root“), eine Exponential-, eine Rayleigh- sowie eine Logarithmische Verteilung gewählt. Das Ergebnis der Nachbearbeitung mit den verschiedenen Algorithmen ist im Vergleich zur Originalaufnahme in Abbildung 2.8 beispielhaft für ein Foto dargestellt. Als Ergebnis des Vergleichs der verschiedenen Methoden wird der auf einer Gleichverteilung der Grauwerte basierende Algorithmus als beste Methode identifiziert.⁸⁸

Alternative Methoden zum Auffinden vorhandener Reifenspuren

Im Rahmen einiger Untersuchungen, insbesondere von Lambourn⁸⁹, wurden alternative Möglichkeiten untersucht, Reifenspuren auf der Fahrbahn zu identifizieren.

Die Grundidee von **chemischen Verfahren** zur Kenntlichmachung von Reifenspuren besteht in der Detektion von Reifeninhaltsstoffen, die auf dem Fahrbahnbelag abgelagert sind. Dahingehende Versuche von Lambourn⁸⁹ haben zwar gezeigt, dass besonders die im Reifematerial beinhalteten Weichmacheröle charakterisiert werden können, bitumenhaltige Fahrbahnbeläge jedoch ähnliche Substanzen enthalten, welche bei der chemischen Analyse auf der Fahrbahn entsprechende Inhaltstoffe aus dem Reifenabrieb überdecken.

Thermografische Verfahren wurden sowohl bei Untersuchungen von Lambourn⁸⁹, als auch von Rábek⁹⁰ und Geveler et al.⁹¹ ausprobiert. Bei Aufnahmen des Bremswegs unmittelbar nach, beziehungsweise während der Bremsung mit einer Wärmebildkamera waren Spuren erkennbar (vgl. Abbildung 2.9), die je nach verwendeter Technik in einem Zeitraum von wenigen Sekunden⁹¹ bis hin zu maximal 30 Minuten⁹⁰ (nur bei trockener Fahrbahn) nach der Überfahrt noch beobachtet werden konnten.

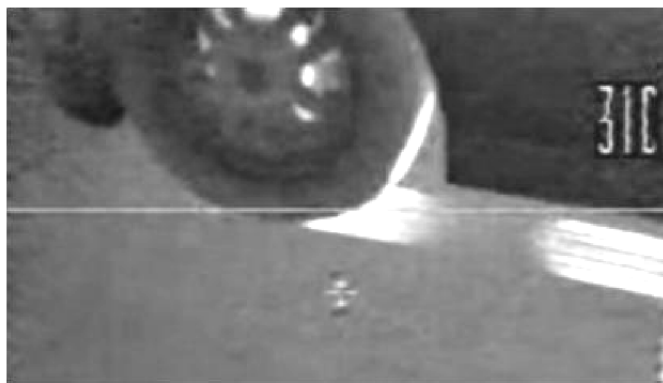


Abbildung 2.9: Wärmebildaufnahme während der Bremsung⁹²

⁸⁸ Wang et al.: Skidmark Patterns and Identification of ABS-Equipped Passenger Car, 2005, S. 3408

⁸⁹ Lambourn: Braking and Cornering Effects With and Without Anti-Lock Brakes, 1994

⁹⁰ Rábek: Optische Methoden für die Sichtbarmachung undeutlicher Spuren auf Fahrbahnen, 2004

⁹¹ Geveler et al.: Untersuchung von ABS-Spuren, 2011

⁹² Geveler et al.: Untersuchung von ABS-Spuren, 2011, S. 67

Als weitere Methode wurden bei Lambourn⁹³ die Reifenspuren bei Dunkelheit mit einem **Nahinfrarot**-Bildkonverter unter einem niedrigen Blickwinkel betrachtet. Hierbei sind zwar die Reifenspuren gut sichtbar gewesen, allerdings wird dieses Verfahren als wenig praxistauglich eingestuft, da es bei Tageslicht nicht anzuwenden ist und sich die Zuordnung von dem Infrarotbild zu der Position auf der Fahrbahn als schwierig erwiesen hat.

Ein anderes Verfahren, welches zum Beispiel von Lambourn⁹⁴ untersucht worden ist, nutzt **fluoreszierende Eigenschaften** von Reifenspuren, um deren Sichtbarkeit zu verstärken. Dazu wurden diese zum einen mit einer gewöhnlichen UV-Lichtquelle und zum anderen im Labor mittels eines Argon-Ionen-Lasers bestrahlt. Während bei UV-Licht keine Fluoreszenz beobachtet wurde, zeigte die Laserbestrahlung bei Betrachtung durch einen Orangefilter eine schwache Fluoreszenz im Bereich der Bremsung. Ein klar erkennbares Bild der Reifenspuren konnte allerdings mit dieser Methode, die zugleich als weitestgehend ungeeignet für die Praxis beurteilt wird, nicht gewonnen werden.

Bei Rábek⁹⁵ wurden ebenfalls Untersuchungen im UV- und Nah-Infrarotbereich durchgeführt, in denen Gummi- und Fahrbahnproben im Labor mit verschiedenen Wellenlängen von 250 nm bis 950 nm bestrahlt und die Reflektion gemessen worden ist. Das Ergebnis der Messungen ist in Abbildung 2.10 dargestellt und zeigt die relative Reflektion der Reifenproben im Vergleich zur Fahrbahn. Es ist zu erkennen, dass die Reflektion von Reifen und Fahrbahn bis 760 nm annähernd gleich ist und danach im Nah-Infrarotbereich aufgrund der Fahrbahntextur eine starke Reflektionsstreuung einsetzt, die deutlich höher als die Zunahme der Fahrbahnreflektion ist. Daraus wird der Schluss gezogen, dass keine Sichtbarkeitserhöhung außerhalb des sichtbaren Wellenlängenbereichs möglich ist.

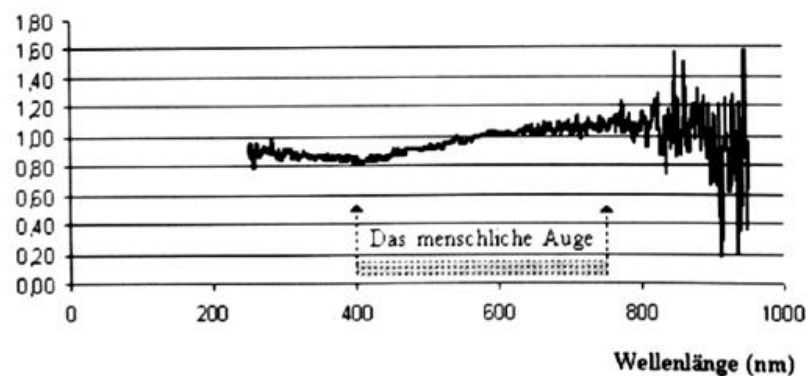


Abbildung 2.10: Relative Reflektion einer Reifenprobe im Vergleich zur Fahrbahn über der Wellenlänge⁹⁶

⁹³ Lambourn: Braking and Cornering Effects With and Without Anti-Lock Brakes, 1994

⁹⁴ Lambourn: The calculation of motor car speeds from curved tyre marks, 1989

⁹⁵ Rábek: Optische Methoden für die Sichtbarmachung undeutlicher Spuren auf Fahrbahnen, 2004

⁹⁶ Rábek: Optische Methoden für die Sichtbarmachung undeutlicher Spuren auf Fahrbahnen, 2004, S. 258

Im Rahmen einer Forschungsarbeit von Wang^{97,98,99}, die sich mit der Erkennung von Reifenprofilen anhand von Blockierspuren beschäftigt, um beispielsweise bei Unfällen mit Fahrerflucht anhand einer Datenbank mit Reifenprofilen die Reifen des verursachenden Fahrzeugs zu identifizieren, wurde ein Verfahren zur automatisierten Erkennung der Spurränder auf den aufgenommenen Fotos entwickelt¹⁰⁰. Dabei werden die Bilder von Blockierspuren, die als Ausgangsmaterial dienen, senkrecht von oben aufgenommen, um annähernd parallele Kanten im Bild zu erhalten. Der Bildverarbeitungsprozess gliedert sich in die Schritte Reifenspurlokalisierung, Segmentierung, Merkmalsextraktion, Matching und Reifenidentifikation. Der Algorithmus verwendet verschiedene Methoden zur Merkmalerkennung, beispielsweise „Region Growing“ zur Lokalisierung der Spur, der Hough-Transformation zur Erkennung des Spurwinkels zur Bildrichtung sowie der Verwendung des Sobel-Filters zur Kantendetektion. Die Verfahren basieren im Wesentlichen auf der Eigenschaft der Spur, im Bild, deutlich mehr dunkle Pixel als der Rest der Fahrbahn zu besitzen. Die Kanten der Reifenspuren werden letztlich durch Binarisierung des um den gefundenen Spurwinkel gedrehten und auf den lokalisierten Bereich zugeschnittenen Grauwertbildes anhand eines Schwellwertes und Anwendung von Kantendetektionsalgorithmen extrahiert. Der Schritt der Kantenextraktion ist grafisch in Abbildung 2.11 dargestellt.

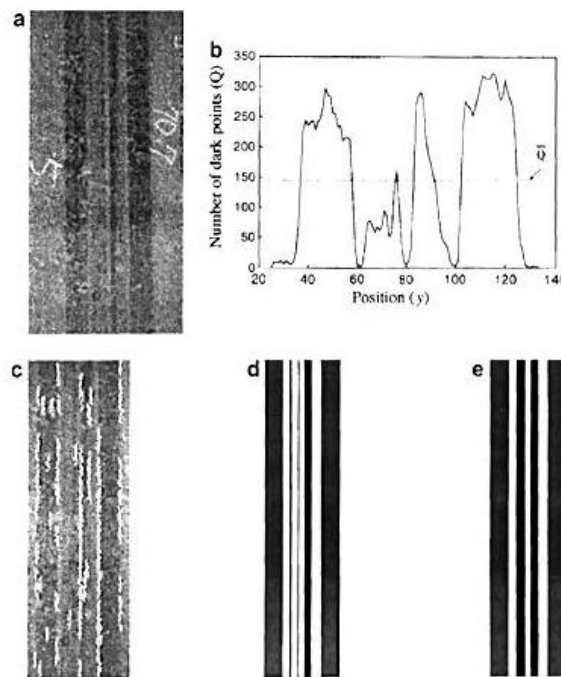


Abbildung 2.11: Extraktion der Kanten und Breite der Profilrippen¹⁰¹.

⁹⁷ Wang: A distance-based matching model for classifying tire-marks at accident scene, 2003

⁹⁸ Wang: A Tire-Mark Identification Scheme for Suspected Vehicle Detection in Hit and Run Accident, 2005

⁹⁹ Wang et al.: Skidmark Patterns and Identification of ABS-Equipped Passenger Car, 2005

¹⁰⁰ Wang et al.: A line-based skid mark segmentation system using image-processing methods, 2008

¹⁰¹ Wang et al.: A line-based skid mark segmentation system using image-processing methods, 2008, S. 401

Bild a zeigt das zugeschnittene Originalbild, Bild b die Spaltensumme der Pixel unterhalb des festgelegten Schwellwerts über der Bildbreite und Bild c die Verteilung gefundener vertikaler Kanten im Bild. Laterale Kantenpositionen, die nicht mehrfach im Bild auftauchen, werden eliminiert. Dies ist in Bild d dargestellt. Unter der Annahme einer symmetrischen Profilgestaltung bezüglich der Profilrippen wird der schwächer sichtbare Spurbereich zwischen dritter und vierter Kante gefüllt. Das Ergebnis ist in Bild e dargestellt. Hinsichtlich der allgemeinen Anwendbarkeit des Verfahrens zur objektiven Detektion von Reifenspuren wird eingeräumt, dass die Zuverlässigkeit der Merkmalerkennung mit abnehmendem Spurkontrast deutlich abnimmt, da es bei sinkendem Schwellwert bei der Binarisierung und anschließender Kantendetektion zu einer Zunahme an Falsch-Positiven durch dunkle Pixel der inhomogenen Fahrbahn kommt. Die Methode wird daher nur für Blockierspuren mit durchgängiger beziehungsweise einheitlich dunkler Füllung empfohlen¹⁰².

2.2 Entstehung von Reibspuren

Grundsätzlich wird in der Literatur¹⁰³ angenommen, dass die Entstehung von Reibspuren ganz allgemein die Reibung, das heißt gleitende Relativbewegung, zwischen Reifen und Fahrbahn voraussetzt. Dabei kommt es zum einen zum Verschleiß und zum anderen zur Erwärmung des Reifens und der Fahrbahn in Abhängigkeit der Reibleistung. Beide Mechanismen führen sowohl reifen- als auch fahrbahnseitig unter bestimmten Bedingungen zur Entstehung sichtbarer Reifenspuren.

2.2.1 Reifenseitiger Anteil

Auf den größtenteils vorzufindenden Fahrbahnbelägen Beton und Asphaltbeton haften abgeriebene Gummipartikel des Reifens auf der Fahrbahn, die in einer bestimmten Konzentration als Spur sichtbar werden. Dabei spielen verschiedene Faktoren eine Rolle: Eine häufig genannte Voraussetzung ist ein **bestimmter minimaler Schlupf** am Reifen. Nach Danner und Halm¹⁰⁴ liegen die Mindestwerte für Längsschlupf zwischen 8 % und 10 % beziehungsweise für Schräglaufwinkel zwischen 5 und 10°. Neuere Untersuchungen von Simmermacher et al.^{105,106} bestätigen im Wesentlichen die untere Sichtbarkeitsgrenze für Schräglaufwinkel zwischen 5° und 9°, berichten aber von sichtbaren Bremsspuren unter Längsschlupfwerten zwischen 3 % und 4 %. Als weitere

¹⁰² Wang et al.: A line-based skid mark segmentation system using image-processing methods, 2008, S. 408

¹⁰³ zum Beispiel in Danner et al.: Technische Analyse von Verkehrsunfällen, 1981, S. 266

¹⁰⁴ Danner et al.: Technische Analyse von Verkehrsunfällen, 1981

¹⁰⁵ Simmermacher et al.: Pkw-Drift und -Schleuderspuren unter Einfluss der Regelsysteme ABS und ESP und der Parameter Reifenart und Reifendruck, 2009

¹⁰⁶ Simmermacher et al.: Pkw-Reifenspuren unter Einfluss der Regelsysteme ABS und ESP und der Parameter Reifenart und Reifendruck, 2009

Einflussfaktoren auf die Höhe des Abriebs werden die Oberflächenbeschaffenheit und der -zustand genannt. Nach Engels¹⁰⁷ begünstigt zum Beispiel eine hohe Feinrauhigkeit (Wellenlänge 10 µm bis 1 mm) der Fahrbahn die Entstehung von Reibspuren, während bei nasser Fahrbahn keine beziehungsweise deutlich schwächere Spuren entstehen.

Neben dem rein mechanischen Verschleiß wird, beispielsweise bei Halonbrenner¹⁰⁸, für das Entstehen von Blockierspuren¹⁰⁹ das **Erreichen einer kritischen Reifentemperatur** vorausgesetzt, die zum thermischen Verschleiß des Reifens führt. Hinsichtlich der Höhe der erforderlichen Temperaturen bei der Reibung zwischen Reifengummi und Fahrbahn haben Gehman et al.¹¹⁰ Untersuchungen an Proben verschiedener vulkanisierter Gummimischungen vorgenommen. Als thermischer Verschleiß werden dabei die thermische Zersetzung und das Schmieren der Gummimischung verstanden. Der Fokus der Arbeit lag dabei auf der Bestimmung der Schmiertemperaturen in Abhängigkeit unterschiedlicher Mischungsfüllstoffe im Vergleich zu Naturkautschuk. Ein deutlicher Anstieg des thermischen Verschleißes zeigte sich bei Naturkautschuk ab ca. 150 °C¹¹¹ und nahm durch Zugabe von Füllstoffen generell zu. Die höchste Schmiertemperatur für Naturkautschuk wurde bei ca. 250 °C gemessen, während sich bei synthetischem Kautschuk (SBR) bis zu einer gemessenen Temperatur von ca. 300 °C kein Schmieren gezeigt hat.

In einer Studie von Sakai und Araki¹¹² wurde ein thermodynamisches Modell eines Profilblocks erstellt, um die Höhe und den zeitlichen Verlauf der Temperaturverteilung über die Dicke des Profilblocks während der Reifenvulkanisation sowie Gleitvorgängen durch extreme Kurvenfahrten und Blockierbremsungen zu berechnen. Zur Validierung des Modells kam ein Reifen zum Einsatz, dessen Schmiertemperatur bei 200 °C bestimmt wurde. Als Wärmequelle in der Kontaktzone wird die Reibleistung P_R nach (2.14) berechnet, welche zu etwa einem Drittel in den Reifen geht. Darin sind α der Schräglaufwinkel, λ der Längsschlupf, μ_g Gleitreibwert, v die Fahrzeuggeschwindigkeit und F_z die Radlast.

$$P_R = \sqrt{\sin^2 \alpha + \lambda^2} \cdot \mu_g \cdot v \cdot F_z \quad (2.14)$$

Die aus dem Modell berechneten Zeitverläufe der Reifenoberflächentemperatur in der Kontaktzone sind für einen Gleitreibwert von $\mu_g = 0,8$ in und konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit von $v = 100$ km/h in Abbildung 2.12 links in Abhängigkeit des Schräglaufwinkels und rechts in Abhängigkeit des Längsschlupfs dargestellt.

¹⁰⁷ Engels: Die Bedeutung des Spurzeichnungsverhaltens von PKW mit ABV für die Unfallrekonstruktion, 1990

¹⁰⁸ Halonbrenner: Die Beurteilung von Reifenspuren, 1993

¹⁰⁹ vgl. Kapitel 2.1.1

¹¹⁰ Gehman et al.: Smearing of Vulcanized Rubber, 1955

¹¹¹ umgerechnete Werte aus Originalquelle in °F

¹¹² Sakai et al.: Thermal Engineering Analysis of Rubber Vulcanization and Tread Temperatures During Severe Sliding of a Tire, 1999

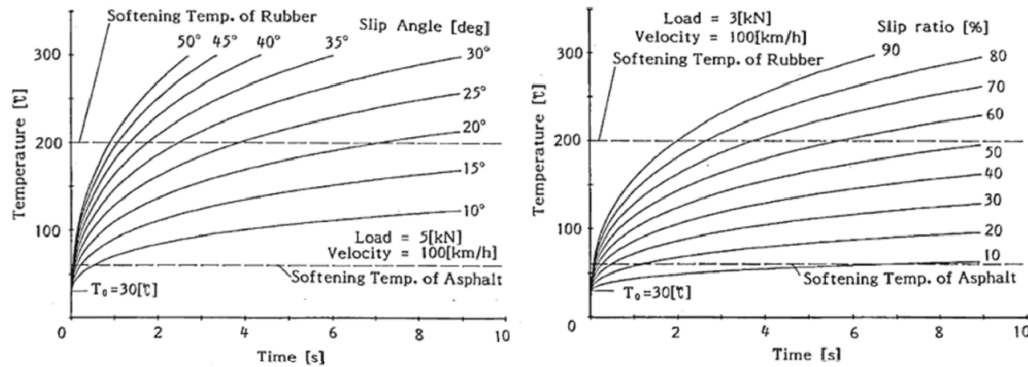


Abbildung 2.12: Temperatur-Zeit-Verlauf an der Reifenoberfläche im Latsch für verschiedene Schräglaufwinkel (links) und Längsschlupfwerte (rechts)¹¹³.

Aus den Darstellungen ist zu erkennen, dass die Dauer zum Erreichen der Schmiertemperatur („Softening Temperature“) bei sehr hohen Längs- und Querschlupfwerten nur im Bereich weniger Sekunden liegt, aber dann mit abnehmendem Schlupf überproportional ansteigt. Bei konstanten thermodynamischen Eigenschaften von Reifen und Fahrbahn ist das Erreichen der Schmiertemperatur beziehungsweise die dafür benötigte Dauer von der Höhe der Reibleistung abhängig. Nach Sakai und Araki erklärt das Modell daher auch, warum es bei Lkw aufgrund der deutlich höheren Radlasten (F_z) sehr viel schneller zu Blockierspuren als bei Pkw kommt. Eine nasse Fahrbahn wirkt sich aufgrund der höheren Wärmeabfuhr auch hier nachteilig auf die Entstehung von Schmier Spuren aus beziehungsweise erhöht die Dauer zum Erreichen der kritischen Temperatur.¹¹⁴

2.2.2 Fahrbahnseitiger Anteil

Die Entstehung von Reifenspuren wird nicht nur auf die Ablagerung von Reifenmaterial durch mechanischen oder thermischen Verschleiß zurückgeführt, sondern, abgesehen von dem Verwischen von Schmutz, Staub und Steinchen, auch auf Veränderungen an der Fahrbahn, die durch den Reibprozess ausgelöst werden. Dabei wird in der Literatur generell zwischen Beton- und Asphaltbeton-Fahrbahnen unterschieden¹¹⁵. Ein für die Reifenspurenentstehung wesentliches Unterscheidungsmerkmal besteht darin, dass Asphaltfahrbahnen als Bindemittel Bitumen enthalten. Dabei handelt es sich um ein Materialgemisch auf Erdölbasis, welches im vorgesehenen Temperatureinsatzbereich einer Asphaltfahrbahn zwischen festem und flüssigem Aggregatzustand oberhalb der Erweichungstemperatur (ca. 50 °C) wechselt¹¹⁶. Während frische Asphaltfahrbahnen besonders hohe Bitumenkonzentrationen an der Oberfläche aufweisen, setzt sich das hochvis-

¹¹³ Sakai et al.: Thermal Engineering Analysis of Rubber Vulcanization and Tread Temperatures During Severe Sliding of a Tire, 1999, S. 44 und S.45

¹¹⁴ Halonbrenner: Die Beurteilung von Reifenspuren, 1993, S. 202

¹¹⁵ Korn: Beurteilung der Benetzbarkeit und des Adhäsionsvermögens von Bitumen mittels Kontaktwinkelmessungen, 2004, Zugriff am 30.01.2013

¹¹⁶ vgl. Hutschenreuther et al.: Asphalt im Straßenbau, 2010

kose Material mit der Zeit und die Konzentration an der Oberfläche nimmt ab. Gleichzeitig verändert sich das Bitumen aufgrund von Oxidation, Verdunstung und Strukturalterung, was sich farblich durch eine Aufhellung der Fahrbahnoberfläche äußert¹¹⁷. Auf Asphaltfahrbahnen werden, vor allem bei Blockierbremsungen, deutlich intensivere Reifenspuren als auf Betonfahrbahnen beobachtet.

Nach Ahlgrimm und Grandel¹¹⁸ ist dies auf die **thermische Reaktion des Bitumens** zurückzuführen. Dieses würde anschmelzen und dadurch eine schwarze Verfärbung der Kontaktfläche mit dem Reifen erzeugen, die deutlich intensiver als die durch Reifenabrieb erzeugte Schwärzung ist. Auf Betonfahrbahnen hingegen entstünde eine Reifenspur nur aufgrund von haftenden Abriebpartikeln der Reifen.

Deutliche Blockierspuren auf Beton bilden sich nach Sakai und Araki¹¹⁹ nur durch das thermisch bedingte Schmieren des Reifens bei Erreichen der kritischen Temperatur (vgl. Kapitel 2.2.1). Bei Asphaltfahrbahnen wird ebenfalls davon ausgegangen, dass Blockierspuren aufgrund von erweichendem Bitumen entstehen. Da die Erweichungstemperatur (hier mit 60 °C angenommen) deutlich unter der Schmieretemperatur des Reifens (ca. 200 °C) liegt, zeigen sich Blockierspuren auf Asphalt früher. Dies ist ebenfalls in Abbildung 2.12 links in Abhängigkeit des Schräglaufwinkels und rechts in Abhängigkeit des Längsschlupfs dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es bei den verwendeten Beispielswerten schon bei einem Längsschlupf zwischen 10 % und 20 % und Schräglaufwinkeln unter 10° innerhalb von ca. 2 s zum Erreichen der Erweichungstemperatur des Asphalts an der Reifenoberfläche kommt. Dabei ist anzumerken, dass die dargestellten, simulierten Temperaturverläufe nur für eine stationäre Fahrzeugbewegung mit konstanter Reibleistung gelten, wie es beispielsweise an einem Reifenprüfstand oder einem Reifenmessanhänger möglich ist. Bei einer realen Fahrzeugbremsung nimmt die Reibleistung mit der Geschwindigkeit über den Verlauf der Bremsung ab. Weiterhin wird die Drehung des Rades und damit verbundene Abkühlphase außerhalb des Fahrbahnkontakts nicht berücksichtigt. Die dargestellten Temperaturkurven in Abhängigkeit des Schlupfs repräsentieren daher viel mehr die Reifentemperatur im Latsch eines blockierenden Rades bei verschiedenen Gleitgeschwindigkeiten. Bezüglich des Erweichens von Bitumen wird in dem Modell davon ausgegangen, dass dies eintritt, wenn der Reifen mit der entsprechenden Oberflächentemperatur mit der Fahrbahn in Berührung kommt. Die tatsächliche Entwicklung der Temperatur im Asphalt, der je nach Latschlänge und Gleitgeschwindigkeit nur wenige Millisekunden Kontakt mit dem Reifen hat, ist nicht simuliert worden. Es kann also angenommen werden, dass sowohl das Erreichen der Schmieretemperatur bei einem nicht blockierten Reifen sowie das Erreichen der Erweichungstemperatur des Bitumens deutlich längere Zeit benötigen.

¹¹⁷ Korn: Beurteilung der Benetzbarkeit und des Adhäsionsvermögens von Bitumen mittels Kontaktwinkelmessungen, 2004, Zugriff am 30.01.2013

¹¹⁸ Ahlgrimm et al.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 1, 1997, S. 70

¹¹⁹ Sakai et al.: Thermal Engineering Analysis of Rubber Vulcanization and Tread Temperatures During Severe Sliding of a Tire, 1999

Obwohl insbesondere im Zusammenhang mit der Entstehung von Blockierspuren, die Ursache für die fahrbahnseitige Spurverstärkung bei Asphaltoberflächen auf eine Reaktion des Bitumens zurückgeführt wird, bestehen Zweifel hinsichtlich des genauen Wirkmechanismus. Mit dieser Problematik beschäftigt sich eine Studie von Bullas¹²⁰, wobei der eigentliche Fokus der Arbeit nicht auf der Entstehung von Reifenspuren, sondern eines als „low dry friction“ beziehungsweise „Bituplaning“ bezeichneten Phänomens liegt. Dabei werden bei Blockierbremsungen auf trockenen, besonders bitumenreichen NTS-Asphaltfahrbahnen (Negative Texture Surface) Gleitreibwerte gemessen, die deutlich unter den Vergleichswerten von Griffigkeitsmessungen auf den gleichen Belägen liegen. Im Hinblick auf die kurze Kontaktzeit des Reifens mit der Fahrbahn und den dabei erreichbaren Temperaturen bei einer ABS-Bremsung kann als mögliche Ursache das Schmelzen beziehungsweise Erweichen von Bitumen aufgrund der Reibungswärme nicht bestätigt werden. Bullas vermutet daher einen anderen Wirkmechanismus der zur Interaktion mit dem Bitumen führt. Als ein möglicher Mechanismus wird die Diffusion des Bitumens aus der Fahrbahn in das Reifenmaterial genannt. Dieser Mechanismus spielt beispielweise eine Rolle, wenn dem Bindemittel von Fahrbahnen im Herstellungsprozess rezyklierter Reifengummi beigemischt wird¹²¹. Für wahrscheinlicher hält Bullas allerdings aufgrund von öligen Rückständen an den Fahrzeugreifen nach der Bremsung und den gemessenen, mit ölkontaminierten Fahrbahnen vergleichbaren Gleitreibwerten, das schubspannungsinduzierte Ausschwitzen von Öl aus dem Bitumen. Eine Überprüfung dieser Annahme ist im Rahmen der Untersuchung nicht erfolgt. Die bei den durchgeführten ABS-Bremsungen vorgefundenen öligen Spuren sind in Form von Regelflecken entstanden, das heißt während Überschlupfphasen. Über die Höhe des Reifenschlupfs während der Spurerzeugung und ob der Bituplaning-Effekt auch bei modernen ABS-Reglern mit hoher Regelfrequenz und -güte auftritt, wird keine Aussage gemacht.

2.3 Zwischenfazit und Ableitung des Forschungsbedarfs

Bei der Verwendung von Reibspuren in der Unfallrekonstruktion zur Berechnung von Bremsausgangs- oder Kurvengeschwindigkeiten wird mit maximalen Bremsverzögerungs- beziehungsweise Querbeschleunigungswerten für das jeweilige Fahrzeug gerechnet. Dahinter steckt die durch empirische Untersuchungen gestützte Annahme, dass Spurzeichnungen beim Überschreiten der Kraftschlussgrenze des Reifens entstehen. Es ist allerdings auch bekannt, dass die Intensität von Reifenspuren unabhängig von der Höhe der Verzögerung durch höheren Schlupf (vgl. Regelflecken) oder höhere Radlas-

¹²⁰ Bullas: Bituplaning: A Low Dry Friction Phenomenon of New Bituminous Road Surfaces, 2007

¹²¹ Artamendi et al.: Diffusion Kinetics of Bitumen into Waste Tyre Rubber, 2006

ten (zum Beispiel vertikaler Stoß, Lkw) zunimmt, beziehungsweise auch trotz maximaler Verzögerung des Fahrzeugs keine sichtbaren Reifenspuren entstehen können. Dabei zeigen sich neben fahrdynamischen Einflussgrößen auch deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrbahnen und Reifen.

Was die Entstehungsmechanismen von Reibspuren angeht, so wird davon ausgegangen, dass zu Beginn der Spurzeichnung bei Vernachlässigung einer möglichen Fahrbahnkontamination (zum Beispiel durch Schmutz oder Staub) die Spur aus Verschleißpartikeln des Reifens besteht. Je nach Höhe der Reibleistung und in Abhängigkeit der Fahrbahn kann nach einer bestimmten Zeit zusätzlich noch eine Spurverstärkung durch thermische Veränderungen des Bitumens in Asphaltfahrbahnen beziehungsweise das thermisch bedingte Schmelzen des Reifens stattfinden, wobei die Grenztemperaturen für letztgenannten Effekt deutlich höher liegen. Ein konkretes, physikalisch motiviertes Modell zur Erklärung der Annahme, dass die Entstehung von Reibspuren an das Erreichen der Kraftschlussgrenze gekoppelt ist, existiert nicht.

Die Entstehung einer Spur ist neben den notwendigen Bedingungen in der Kontaktzone zwischen Reifen und Fahrbahn vor allem davon abhängig, welche reibungsbedingten Veränderungen der Fahrbahn als sichtbar beurteilt werden. Dies erfolgt in der Praxis subjektiv auf den Prinzipien menschlicher Wahrnehmung. Abgesehen von individuellen Einflüssen des Beobachters (zum Beispiel der Sehstärke) wirken sich dabei die Beleuchtungsverhältnisse sowie die Beobachtungsbedingungen in hohem Maße auf die Erkennbarkeit aus. Alternative Methoden zur Erkennung von Reifenspuren sind bisher nur wenig erforscht. Als vielversprechendste Alternative zur visuellen Erkennung hat sich die Thermografie erwiesen, allerdings sind entsprechende Kameras im Vergleich zu einer Fotooptik sehr hochpreisig und die Spuren unter optimalen Bedingungen in den durchgeführten Untersuchungen nur maximal 30 Minuten nach ihrer Entstehung noch zu erkennen gewesen.

Auf Grundlage der durchgeführten Literaturrecherche ergibt sich die folgende Fragestellung:

Können aus dem Auftreten und den Intensitätsunterschieden von sichtbaren Reifenspuren Informationen über die Höhe fahrdynamisch relevanter Parameter gewonnen werden?

Aus dieser Hauptfrage lassen sich weitere Fragen ableiten, die im Rahmen der Arbeit behandelt werden:

- Unter welchen Voraussetzungen entstehen Reibspuren?
- Welche fahrdynamisch relevanten Größen haben auf die Entstehung und die Intensität der Reibspur einen Einfluss?
- Welche weiteren Faktoren beeinflussen die tatsächliche Intensität?
- Wie können die Sichtbarkeitsgrenze und die Unterschiede in der tatsächlichen Intensität von Reifenspuren objektiv und zuverlässig bewertet werden?

3 Modellbildung

3.1 Grundsätzliche Annahmen

Die Fragestellung, unter welchen Bedingungen beziehungsweise Voraussetzungen Reibspuren entstehen, bezieht sich vor allem auf Spuren an der Sichtbarkeitsgrenze. Während explizite Modellvorstellungen für die Entstehung von Blockierspuren aufgrund des Erreichens kritischer Fahrbahn- oder Reifentemperaturen existieren, ist kein Modell bekannt, welches eine konkrete Berechnung der notwendigen Voraussetzungen für Spuren im unteren Intensitätsbereich ermöglicht. Aus der Literaturrecherche ist bekannt, dass die thermisch induzierten Mechanismen Schmieren des Reifens und Erweichen beziehungsweise Ausölen von Bitumen bei Asphaltfahrbahnen das Erreichen bestimmter Temperaturen im Latsch voraussetzen und nicht unmittelbar, sondern erst nach einer entsprechenden Zeitdauer einsetzen. Dafür ist eine bestimmte minimale Reibleistung erforderlich, welche in Abhängigkeit der thermodynamischen und chemischen Eigenschaften von Reifen und Fahrbahn über der Menge der abgeführten Wärme liegen muss. Der Mechanismus, der jedoch sowohl auf Beton als auch Asphaltfahrbahnen unmittelbar zur Entstehung von Reibspuren führt, ist der mechanische Abrieb von Reifenpartikeln, der im Folgenden als entscheidender Mechanismus für die Entstehung von Reibspuren an der Sichtbarkeitsgrenze angenommen und betrachtet wird.

Da es selbst bei einem frei rollenden Reifen aufgrund abplattungsbedingter Verformungen beziehungsweise dem Ein- und Ausschnappen von Profilblöcken in der Ein- und Auslaufzone des Reifenlatsch zu minimalen Gleitbewegungen¹²² und entsprechendem Verschleiß kommt, wird angenommen, dass eine bestimmte Mindestmenge an Reifenpartikeln pro Fläche auf der Fahrbahn vorhanden sein muss, damit diese als sichtbare Reibspur wahrgenommen wird. Dies ist modellhaft in Abbildung 3.1 dargestellt. Die Sichtbarkeitsgrenze wird dabei als minimal sichtbare Verschleißhöhe verstanden und die Intensität der Reifenspur als proportional zur Verschleißhöhe h_V angenommen. Das Verschleißvolumen V_V , das am Ende der Reibstrecke s_R auf der Fahrbahn zurückbleibt, ergibt sich aus dem Flächenintegral der Verschleißhöhe über die Breite b der Kontaktfläche und dem zurückgelegten Reibweg s_R , gemäß Gleichung (3.1).

$$V_V = \int_0^{s_R} \int_0^b h_V(x, y) dy dx \quad (3.1)$$

¹²² vgl. Roth: Untersuchungen zur Kraftübertragung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn unter besonderer Berücksichtigung der Kraftschlusserkennung im rotierenden Rad, 1993

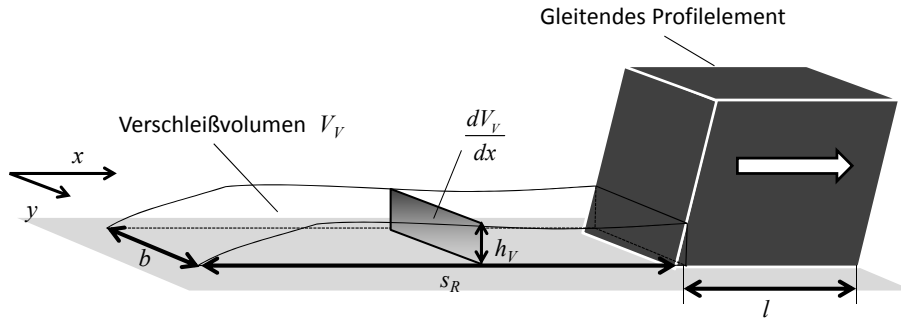


Abbildung 3.1: Modellvorstellung des Zusammenhangs zwischen Verschleißvolumen, -höhe und Spurlintensität¹²³

Nach gängigen Verschleißmodellen, zum Beispiel von Veith¹²⁴ oder Grosch¹²⁵, hängt die Höhe des Verschleißvolumens V_V von der Höhe der als Reibarbeit W_R verrichteten Energiedissipation in der Kontaktfläche in Abhängigkeit der Verschleißrate γ der beiden Reibpartner ab. Die Reibarbeit ergibt sich wiederum als das Integral der Reibkraft F_R über den Weg s_R . Diese Beziehung gibt Gleichung (3.2) wieder¹²⁶.

$$V_V = \gamma \cdot W_R = \gamma \cdot \int_0^{s_R} F_R dx \quad (3.2)$$

Bezogen auf den zurückgelegten Reibweg und die Breite der Kontaktfläche ergibt sich somit durch Gleichsetzen der Formeln (3.1) und (3.2) der in (3.3) dargestellte Zusammenhang zwischen der Verschleißhöhe und der breitenbezogenen Reibkraft

$$\int_0^b h_V(x, y) dy = \gamma \cdot F_R(x) \quad (3.3)$$

Die Verschleißhöhe $h_V(y)$ über der Breite der Kontaktfläche beziehungsweise der Spurbreite ist somit abhängig von der Reibkraftverteilung in Querrichtung, die sich als Integral der Flächenpressungsverteilung $p_N(x, y)$ über die Länge l der Kontaktfläche mit dem Reibwert μ nach Gleichung (3.4) ergibt.

$$h_V(y) = \gamma \cdot \frac{dF_R}{dy} = \int_0^l \gamma \cdot \mu \cdot p_N(x, y) dx \quad (3.4)$$

Unter der Annahme einer gleichmäßigen Flächenpressungsverteilung $p_N(x, y) = \text{const.}$ in der Kontaktfläche, vereinfacht sich Gleichung (3.4) zu (3.5). Darin ist die mittlere Verschleißhöhe über der Spurbreite $h_{V,m}$ in Abhängigkeit der Reibkraft F_R , der Breite b der Kontaktfläche sowie der Verschleißrate γ dargestellt.

$$h_{V,m} = \gamma \cdot \mu \cdot p_N \cdot l = \gamma \cdot \frac{F_R}{b} \quad (3.5)$$

¹²³ vgl. Seipel et al.: Approach to Determine Slip Values Based on the Intensity of Tire Marks with Respect to Tire and Road Properties, 2013, S. 3

¹²⁴ Veith: The Most Complex Tire-Pavement Interaction: Tire Wear, 1986, S. 139

¹²⁵ Grosch: Rubber Abrasion and Tire Wear, 2008, S. 486

¹²⁶ vgl. Czichos et al.: Tribologie-Handbuch, 2010; S. 117

Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Größen der Verschleißformel (3.5) eingegangen.

3.2 Reibkraft

Für einen gleitenden Profilblock, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, ist die Kraft, die der Gleitbewegung entgegen gerichtet ist, gleich der Reibkraft und somit der streckenbezogenen Reibarbeit. Für einen Reifen gilt dies nur im blockierten Zustand, da in diesem Fall die Reibstrecke dem zurückgelegten Weg entspricht. Wird der Reifen hingegen unter einem bestimmten Schlupf bewegt, so ist das Verhältnis aus Reibweg und zurückgelegtem Weg gleich dem Gleitschlupf zwischen Reifen und Fahrbahn. Die Reibkraft, die entlang des zurückgelegten Weges der Radnabe Reibarbeit verrichtet, ist daher nicht identisch mit der Umfangskraft am Reifen, sondern dem Produkt aus Umfangskraft und Gleitschlupf. In Anlehnung an Grosch¹²⁷, wo allerdings keine Differenzierung zwischen dem Deformations- und Gleitschlupf stattfindet, ergibt sich damit die in Gleichung (3.6) angegebene Formel für die Reibkraft F_R unter reinem Längsschlupf in Abhängigkeit der Umfangskraft F_x und des Gleitschlupfs $\lambda_{g,x}$.

$$F_{R,x} = F_x \cdot \lambda_{g,x} \quad (3.6)$$

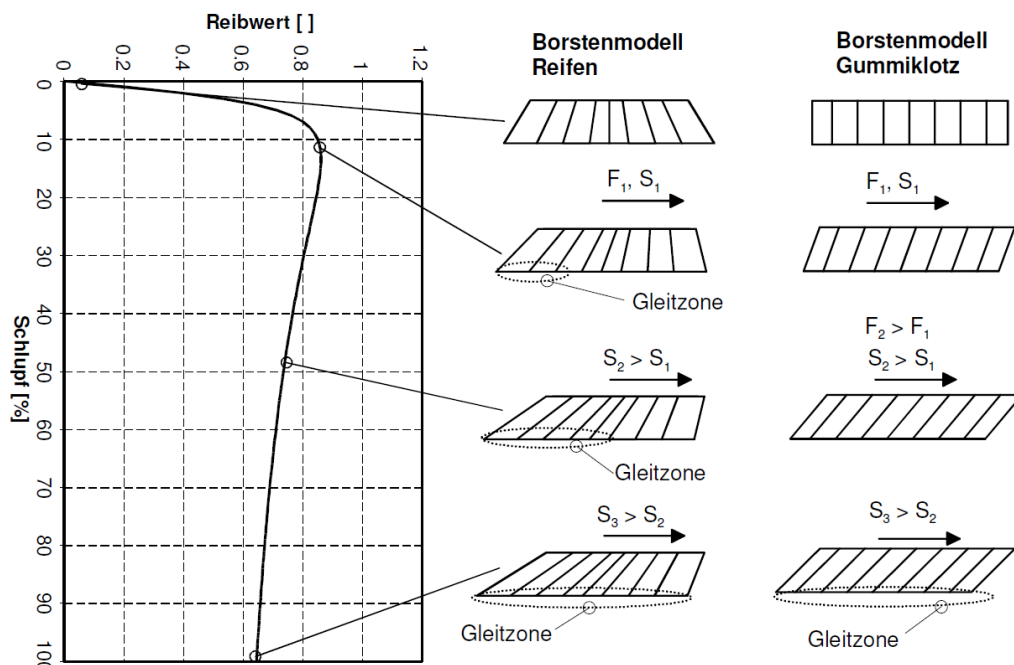


Abbildung 3.2: Modell zu Entstehung von Deformation- und Gleitschlupf am gebremsten Rad nach Fach¹²⁸.

¹²⁷ vgl. Grosch: Rubber Abrasion and Tire Wear, 2006, S. 561

¹²⁸ Fach: Lokale Effekte der Reibung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn, 1999, S. 75

Bezüglich des Zusammenhangs zwischen dem Radschlupf λ und dem Gleitschlupf λ_g (sowohl in Längs- als auch in Querrichtung) ist aus dem Borstenmodell¹²⁹ – welches die Verformung der Profilelemente eines Reifens im Fahrbahnkontakt beschreibt – bekannt, dass zu Beginn des Kraftaufbaus am Reifen mit zunehmenden Schlupf zunächst eine Deformation der Profilelemente erfolgt und es erst nach schubspannungsbedingtem Überschreiten der maximalen Deformationslänge zu Gleitvorgängen im Latsch kommt (vgl. Abbildung 3.2).

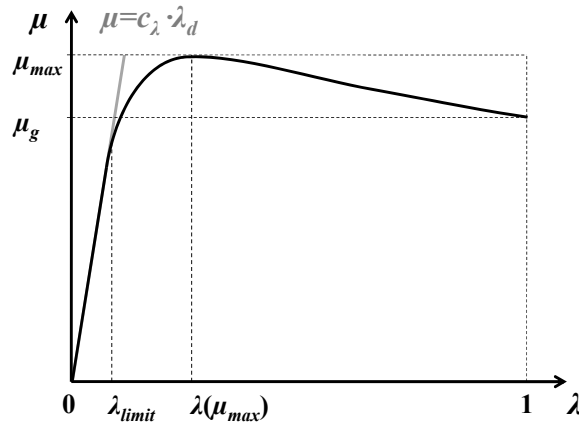


Abbildung 3.3: Exemplarische μ -Schlupf-Kurve eines Reifens mit linearem Deformations-schlupfanteil

Unter der Annahme, dass im linearen Bereich der in Abbildung 3.3 exemplarisch dargestellten Reibwert-Schlupf-Kurve eines Reifens nur Deformationsschlupf λ_d vorliegt, kann dieser über die Geradengleichung (3.7) mit der Reifensteifigkeit c_λ als Anstieg und dem Radschlupf-abhängigen Reibwert μ berechnet werden. Aus dieser Darstellung geht auch hervor, dass erst dann Gleiten im Latsch auftritt, wenn der Radschlupf größer als der Schlupf zu Beginn der Degression der Reifenkennlinie, hier als λ_{limit} bezeichnet, ist.

$$\lambda_d = \frac{\mu}{c_\lambda} \quad (3.7)$$

Der Gleitschlupf λ_g ergibt sich aus der Subtraktion des Deformationsschlupfs λ_d vom Radschlupf λ nach Gleichung (3.8):

$$\lambda_g = \lambda - \frac{\mu}{c_\lambda} \quad (3.8)$$

Für die Reibkraft unter reinem Längsschlupf λ_x ergibt sich damit der folgende Zusammenhang:

$$F_{R,x} = F_x \cdot \left(\lambda_x - \frac{\mu_x}{c_x} \right) \quad (3.9)$$

Unter reinem Querschlupf werden die gleichen Annahmen getroffen. Demnach ergibt sich der Gleitschlupf $\lambda_{g,y} = \sin(\alpha_d)$ in Querrichtung nach Gleichung (3.10) mit dem

¹²⁹ vgl. Fach: Lokale Effekte der Reibung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn, 1999, S. 77 ff.

effektiven Schräglaufwinkel α_{eff} , der effektiven Quersteifigkeit $c_{y,eff}$, sowie dem Reibwert μ_y .

$$\sin \alpha_d = \sin \alpha_{eff} - \frac{\mu}{c_{y,eff}} \quad (3.10)$$

Der effektive Schräglaufwinkel α_{eff} bezeichnet den zwischen Latsch und Fahrbahn vorliegenden Schräglaufwinkel, der aufgrund der Verdrehung des Reifens um die Hochachse kleiner als der auf die Radmittelebene bezogene Schräglaufwinkel α ist (vgl. Abbildung 3.4). Demnach ist auch die auf den effektiven Schräglaufwinkel bezogene Quersteifigkeit $c_{y,eff}$ höher. Unter der Annahme eines annähernd symmetrischen Reifenverhaltens zwischen Längs- und Querkraftaufbau ($c_{y,eff} = c_x$) wird der effektive Schräglaufwinkel über das Verhältnis der Seitensteifigkeit c_y zur Längssteifigkeit c_x aus dem radbezogenen Schräglaufwinkel in Gleichung (3.11) berechnet¹³⁰.

$$\sin \alpha_{eff} = \frac{c_y}{c_x} \cdot \sin \alpha \quad (3.11)$$

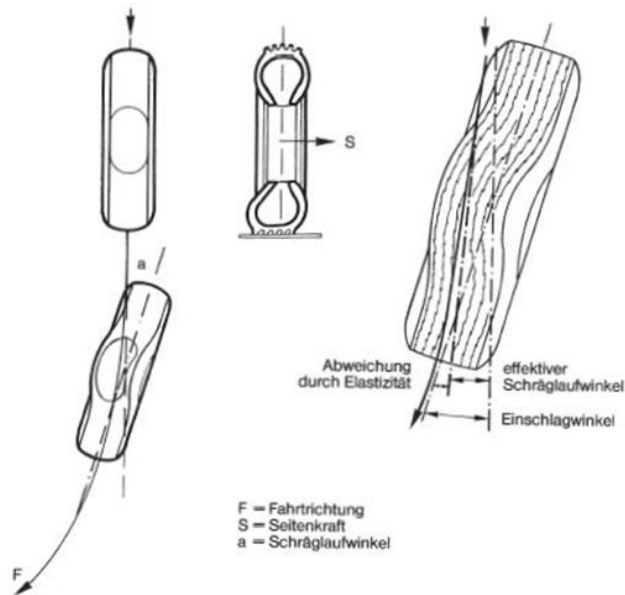


Abbildung 3.4: Unterschied zwischen radbezogenem und effektivem Schräglaufwinkel¹³¹

Damit ergibt sich schließlich für die Reibkraft unter reinem Schräglauf die in Gleichung (3.12) dargestellte Beziehung:

$$F_{R,y} = F_y \cdot \left(\frac{c_y}{c_x} \cdot \sin \alpha - \frac{\mu_y}{c_x} \right) \quad (3.12)$$

Nach dem in Abbildung 3.5 dargestellten „Reibungskuchen“-Modell von Weber¹³² lässt sich die resultierende Reibkraft $F_{R,res}$ bei kombiniertem Längs- und Querschlupf als Produkt der resultierenden Führungskraft sowie des resultierenden Schlupfs am Reifen

¹³⁰ Winner: Fahrdynamik und Fahrkomfort, 2012, S. 32

¹³¹ Liermann et al.: Reifen- und Kautschuk-Technologie im Fahrzeugbereich, 1985, S. 85

aus den vektoriellen Summen der Umfangs- und Querkomponenten der jeweiligen Größen gemäß Gleichung (3.13) darstellen.

$$F_{R,res} = F_{res} \cdot \lambda_{g,res} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \cdot \sqrt{\lambda_{g,x}^2 + \lambda_{g,y}^2} \quad (3.13)$$

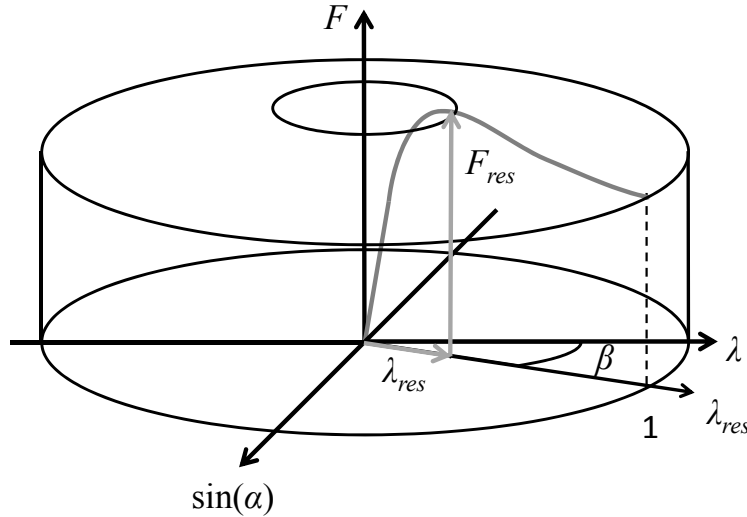


Abbildung 3.5: „Reibungskuchen“-Modell nach Weber¹³²

Mit der Radlast F_z und der Beziehung $F_{res} = F_z \cdot \mu_{res}$ zwischen der Radlast und der resultierenden Reifenführungskraft F_{res} mit dem resultierenden Reibwert μ_{res} ergibt sich die Reibkraft als Funktion der Radlast, des Längs- und Querschlupfs, der Reifensteifigkeit und des resultierenden Reibwerts, gemäß Gleichung (3.14).

$$F_{R,res} = F_z \sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2} \cdot \left(\sqrt{\lambda_x^2 + \left(\frac{c_y}{c_x} \right)^2} \cdot \sin^2 \alpha - \frac{\sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}}{c_x} \right) \quad (3.14)$$

3.3 Reibbreite

Aus Gleichung (3.5) geht hervor, dass sich die Verschleißhöhe bei konstanter Reibkraft und Verschleißrate reziprok zur Breite der Reib- beziehungsweise Kontaktfläche verhält. Die Definition der Ausdehnung der Kontaktfläche richtet sich dabei nicht nach dem reifenfesten Koordinatensystem, sondern der Richtung des resultierenden Reibkraftvektors. Die Reibbreite ist demnach senkrecht zur Reibrichtung definiert und dreht sich entsprechend mit dem resultierenden Schlupfwinkel β , der nach Gleichung (3.15) von der Höhe des Längsschlupfes λ_x und des effektiven Schräglaufwinkels α_{eff} nach Gleichung (3.11) abhängt.

¹³² vgl. Weber: Reifenführungskräfte bei schnellen Änderungen von Schräglauf und Schlupf, 1981

$$\beta = \arctan\left(\frac{c_x}{c_y} \cdot \frac{\sin \alpha}{\lambda_x}\right) \quad (3.15)$$

Zur Verdeutlichung des Zusammenhangs zwischen der Reibrichtung und der Reibbreite zeigt Abbildung 3.6 den Reifen mit resultierendem Kraftvektor und der Kontaktfläche in einer Prinzipdarstellung. Darin bezeichnen x_R und y_R die Koordinaten parallel und senkrecht zum resultierenden Kraftvektor.

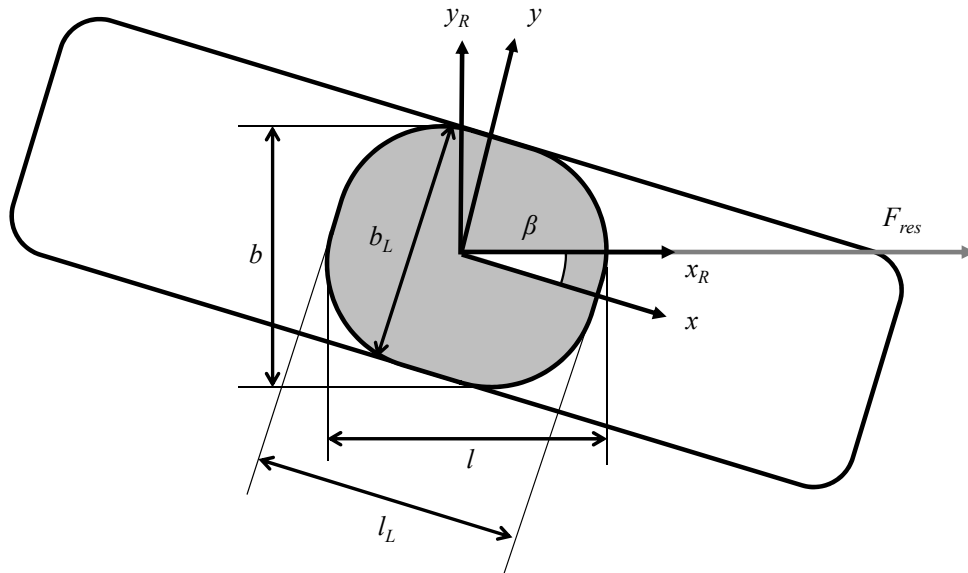


Abbildung 3.6: Draufsicht des Reifens mit Kontaktfläche (grau) und resultierendem Kraftvektor

Aus der Darstellung wird deutlich, dass die Reibbreite nicht konstant ist, sondern je nach Schlupfrichtung zwischen der radbezogenen Latschbreite bei reinem Längsschlupf ($\beta = 0^\circ$) oder der Latschlänge bei reinem Querschlupf ($\beta = 90^\circ$) variieren kann. Bei vereinfachender Annahme der Reifenaufstandsfläche als Ellipse, kann die Reibbreite b in Abhängigkeit des Schlupfwinkels β und der Breite b_L und Länge l_L des Latsches (bezogen auf die Radmittelebene, vgl. Abbildung 3.6) nach Gleichung (3.16) berechnet werden.

$$b = \sqrt{(b_L \cdot \cos \beta)^2 + (l_L \cdot \sin \beta)^2} \quad (3.16)$$

Die Fläche des Latsches ist im Wesentlichen von dem Reifeninnendruck p_i^{133} und der Radlast F_z sowie der vertikalen Einfederung z des Reifens in Abhängigkeit der Karkassen-Steifigkeit k nach Gleichung (3.17) abhängig¹³⁴.

$$A = \frac{F_z - k \cdot z}{p_i} \quad (3.17)$$

Mit der Ellipsenfläche $A = \pi \cdot b_L \cdot l_L$ ergibt sich damit für die Breite und Länge des Latsches der in Gleichung (3.18) dargestellte Zusammenhang.

¹³³ definiert als Differenzdruck zur Umgebung

¹³⁴ Zeller: Handbuch Fahrzeugakustik, 2009, S. 224

$$b_L \cdot l_L = \frac{F_z - k \cdot z}{\pi \cdot p_i} \quad (3.18)$$

Solange die Breite der Aufstandsfläche kleiner als die Breite des Laufstreifens $b_{L,max}$ des Reifens ist, wird von einem konstanten Verhältnis $\varepsilon = b_L/l_L$ der beiden Halbachsen der elliptischen Aufstandsfläche ausgegangen. Damit ergibt sich die Latschbreite bei konstantem Reifeninnendruck als Funktion der Radlast nach Gleichung (3.19). Nach Erreichen der maximalen Breite $b_{L,max}$ wächst der Latsch bei weiterer Zunahme der Radlast nur noch in der Länge.

$$b_L = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot (F_z - k \cdot z)}{\pi \cdot p_i}} \quad (3.19)$$

Bei dem dargestellten Reifen wird die gesamte Fläche innerhalb des Umfangs der abgeplatteten Aufstandsfläche als Kontaktfläche angenommen, wie dies idealerweise bei einem profillosen Reifen auf glatter Fahrbahn der Fall wäre. Bei einem Reifen mit Profil muss der entsprechende Negativanteil berücksichtigt werden. Bei einer annähernd homogenen Flächenpressungsverteilung über den Reifenlatsch ist die Flächenpressung im Bereich des Profil-Positivanteils gleich der mittleren Flächenpressung und im Bereich des Negativanteils gleich Null. Bei der Integration der Flächenpressungsverteilung in Schlupfrichtung x_R ergibt sich somit die Reibkraftverteilung senkrecht zur Schlupfrichtung y_R , die nach Gleichung (3.4) unter Annahme einer konstanten Verschleißrate und eines konstanten Reibwerts über die Kontaktfläche der Verschleißhöhe h_V proportional ist:

$$h_V(y_R) = \gamma \cdot \lambda_g \cdot \mu \cdot \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} p_N(x_R, y_R) dx_R \quad (3.20)$$

Zur Verdeutlichung dieses Zusammenhangs ist die Verschleißhöhe über der Reibbreite für einen idealisierten Reifen mit Umfangsprofil in Abhängigkeit der Richtung des resultierenden Schlupfvektors bei $\lambda_{res} = 100\%$ in Abbildung 3.7 dargestellt. Das Integral der Verschleißhöhe über die Reibbreite, also das reibwegbezogene Verschleißvolumen, ist in allen drei Fällen gleich groß.

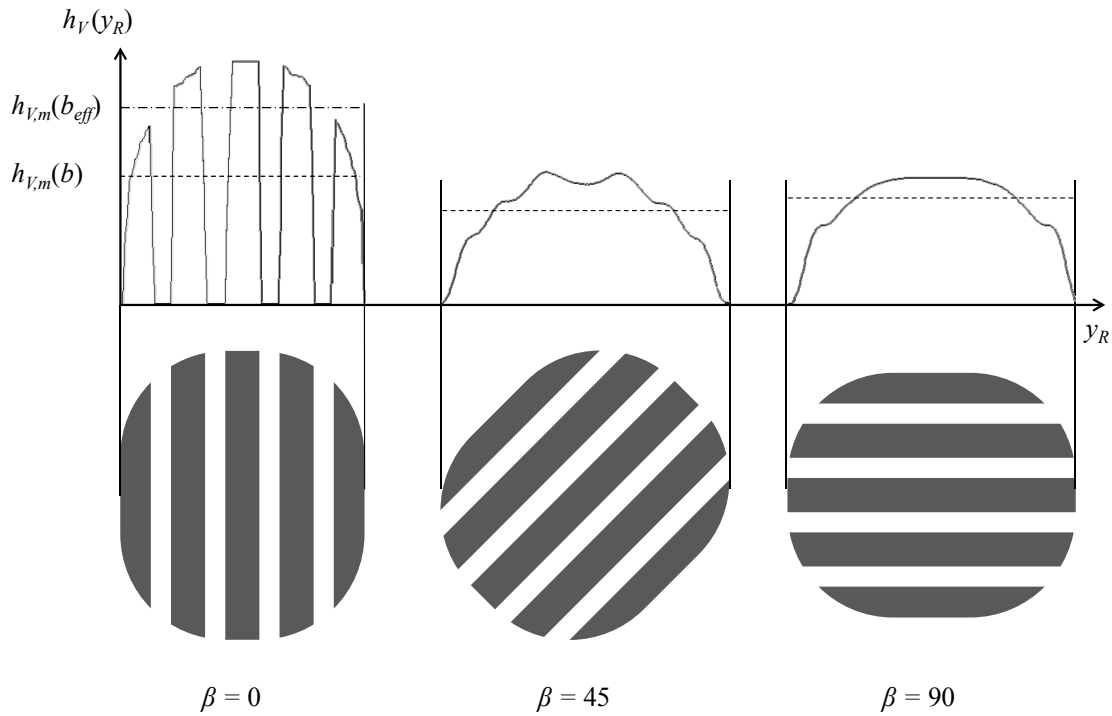


Abbildung 3.7: Verschleißhöhe über die Reibbreite in Abhängigkeit des Profilnegativanteils und des Schlupfwinkels β .

Die Bestimmung der genauen Verschleißhöhe über der Reibbreite setzt die Kenntnis der Flächenpressungsverteilung voraus. In der Regel steht aber, zum Beispiel als Messgröße im Fahrversuch, nur deren Flächenintegral in Form der resultierenden Reibkraft zur Verfügung. Daraus kann die mittlere Verschleißhöhe $h_{V,m}$ als Quotient der Reibkraft und der Spurbreite, multipliziert mit der Verschleißrate, nach Gleichung (3.5) berechnet werden. Für die drei Beispiele in Abbildung 3.7 ist die mittlere Verschleißhöhe jeweils zum Vergleich mit dem Verlauf der Verschleißhöhe über der Reibbreite aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Abweichung der maximalen Verschleißhöhe von dem Mittelwert für die beispielhaft angenommene Profilgestaltung unter reinem Längsschlupf ($\beta = 0^\circ$) besonders groß ist. Aufgrund der Umfangsrillen und des damit verbundenen durchgängigen Profilnegativanteils ist die Verschleißhöhe über die Breite sehr viel inhomogener verteilt als für die beiden anderen dargestellten Schlupfzustände. Bei Reifen, deren Profil einen durchgängigen Negativanteil in einer bestimmten Richtung aufweist, wie dies häufig in Umfangsrichtung der Fall ist, kann die Abweichung der mittleren von der maximalen Verschleißhöhe dadurch reduziert werden, dass nicht über die gesamte Spurbreite b , sondern nach Gleichung (3.21) über die effektive Reibbreite b_{eff} , durch Subtraktion des Negativanteils b_{neg} , gemittelt wird.

$$h_{V,m} = \gamma \cdot \frac{F_R}{b - b_{neg}} = \gamma \cdot \frac{F_R}{b_{eff}} \quad (3.21)$$

Die mittlere Verschleißhöhe über die effektive Breite $h_{V,m}(b_{eff})$ ist zum Vergleich ebenfalls in Abbildung 3.7 für $\beta = 0^\circ$ dargestellt. Dabei ist die Abweichung von der maximalen Verschleißhöhe deutlich geringer.

3.4 Spurzeichnungssensitivität

Als Spurzeichnungssensitivität wird in dieser Arbeit das Verhältnis zwischen der resultierenden Spurintensität und dem Quotienten aus Reibkraft und Reibbreite verstanden und beschreibt die „Neigung“ einer bestimmten Reifen-Fahrbahn-Kombination zur Ausbildung sichtbarer Reifenspuren¹³⁵. Während die Höhe der Reibkraft im Wesentlichen durch fahrdynamische Größen bestimmt wird, beschreibt die Spurzeichnungssensitivität den Reifen- und Fahrbahneinfluss. Hinsichtlich des Entstehungsmechanismus von Reibspuren aufgrund von Reifenabrieb wird die Wirkkette zwischen der Reibkraft pro Reibbreite F_R/b_{eff} als Eingangsgröße und der Intensität der Reifenspur, durch den Kontrast K zur Fahrbahn beschrieben, als Ausgangsgröße nach Abbildung 3.8 in zwei Schritte unterteilt: Der Verschleiß des Reifens aufgrund der Reibung, der in einer bestimmten Verschleißhöhe resultiert, und die Schwärzung der Fahrbahn aufgrund des Verschleißes, die in einer bestimmten Intensität beziehungsweise Kontrast resultiert.

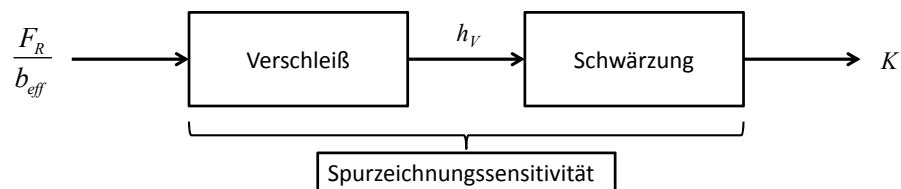


Abbildung 3.8: Wirkkette der Reibspurentstehung in Abhängigkeit der Spurzeichnungssensitivität.

Die Spurzeichnungssensitivität wird nach dieser Darstellung sowohl von den tribologischen Eigenschaften hinsichtlich des Verschleißes als auch von den optischen Eigenschaften des Reifens und der Fahrbahn, hinsichtlich des resultierenden Kontrasts beeinflusst.

3.4.1 Tribologische Einflussgrößen

Wie bereits zu Beginn des Kapitels dargestellt, hängt die Verschleißhöhe mit der breitenbezogenen Reibkraft über die Verschleißrate γ nach Gleichung (3.21) zusammen. Als tribologische Einflussgrößen auf die Spurzeichnungssensitivität werden Größen verstanden, die die Höhe der Verschleißrate beeinflussen. Da der Verschleiß von der Höhe der Reibkraft und diese wiederum von der Reifenhaftung abhängig ist, wird davon ausgegangen, dass Fahrbahn- und reifenseitige Einflussfaktoren auf den Reibwert grundsätzlich auch als Einflussfaktoren auf die Verschleißrate in Frage kommen. Einige Beispiele dafür sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. Eine ausführliche Diskussion und Untersuchung dieser Einflussfaktoren ist im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht möglich.

¹³⁵ vgl. Seipel et al.: Die Entstehung von Reifenspuren unter Berücksichtigung von Reifen und Fahrbahn, 2011, S. 197

Tabelle 3.1: Reifen- und fahrbahnseitige Einflüsse auf den Reibwert¹³⁶

Reibpartner	Kategorie	Parameter
Reifen	Bauart	Unterbau
		Querschnitt
		Breite
		Innendruck
		Größe
		Normaldruckverteilung
	Laufstreifen	Profilgeometrie
		Laufflächenkrümmung
		Laufflächentemperatur
		Profiltiefe
		Lamellierung
	Mischung	Füllgrad
		Füllstoff
		Glastemperatur
		Shore-Härte
		Adhäsions-/Hystereseeigenschaften
Fahrbahn	Geometrie	Mikrotextur
		Makrotextur
		Drainagevermögen
		Deckenstruktur
		Spurrinnen
		Fahrbahnneigung
	Fahrbahndecke	Mineralstoffe
		Mischgutzusammensetzung
		Fahrbahntemperatur
		Anfangszustand
		Festigkeit
		Verkehrsbelastung (mech.)
		Witterung (therm. + chem.)

Nach Grosch¹³⁷ ist die Verschleißrate im Wesentlichen von dem Reifenmaterial in der Lauffläche des Reifens und der Schärfe der Fahrbahntextur abhängig, wobei eine hohe Feinrauigkeit der Fahrbahn zu höheren Verschleißraten führt. Zum anderen ist die Verschleißrate für eine gegebene Reifen-Fahrbahn-Kombination von der Temperatur in der Kontaktzone, der Gleitgeschwindigkeit sowie der Flächenpressung abhängig.

Abbildung 3.9 zeigt beispielhaft die Verschleißrate sechs unterschiedlicher Profilmischungen auf Basis drei verschiedener Kautschukarten (SBR, ABR und NR) mit und ohne Ruß als Füllstoff auf identischem Reibbelag in Abhängigkeit der Temperatur. Zu

¹³⁶ Bachmann: Wechselwirkungen im Prozeß der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn, 1998, S. 7

¹³⁷ Grosch: Rubber Abrasion and Tire Wear, 2008, S. 470 ff.

erkennen ist, dass die Verschleißrate mit sinkender Temperatur bis zu einem Minimum abnimmt und danach wieder steil ansteigt. Die Lage dieses Minimums richtet sich in Abhängigkeit der viskoelastischen Eigenschaften der Gummimischung nach dem Punkt der maximalen Dehnbarkeit des Materials¹³⁸. Neben dem eigentlichen Kautschuk beeinflussen Füllstoffe wie Silica oder Ruß je nach ihren Eigenschaften und Konzentration die Abriebsfestigkeit des Reifenprofils.

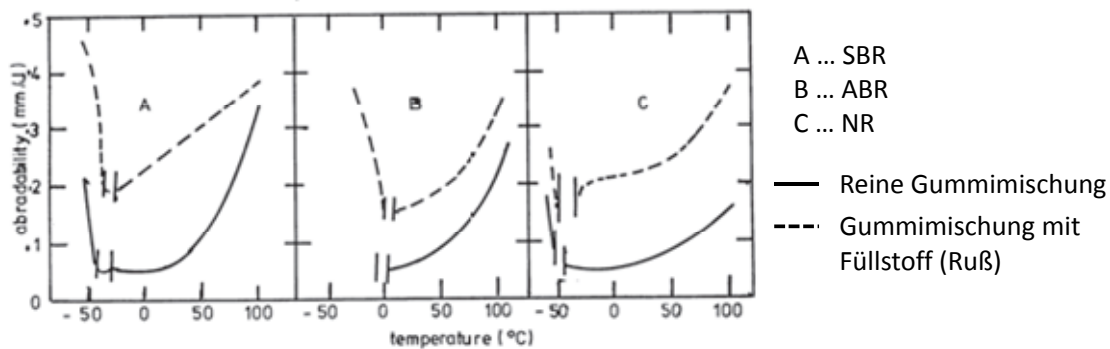


Abbildung 3.9: Abriebsrate von drei verschiedenen Profilmischungen in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur bei konstanter Gleitgeschwindigkeit (0,01 m/s)¹³⁹

Aus der Temperaturabhängigkeit der Abriebsrate lässt sich ableiten, dass die Anfangstemperatur zu Beginn sowie die Temperaturzunahme während des Reibungsvorgangs die Spurzeichnungssensitivität beeinflussen können. Die Anfangstemperatur des Reifens ist dabei u.a. von der Luft- und Fahrbahntemperatur abhängig sowie von der Höhe der zuvor aufgrund innerer und äußerer Reibung dissipierten Energie. Die Höhe der Temperaturzunahme hängt im Wesentlichen von der Höhe der Reibleistung als Produkt aus Reibkraft und Gleitgeschwindigkeit ab. Zu Beginn der Reifenspurentstehung sowie bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten wird daher angenommen, dass die Temperaturerhöhung vernachlässigbar ist.

Bezüglich des Einflusses der Flächenpressung wurde in experimentellen Untersuchungen von Grosch¹⁴⁰ ein überproportionaler Anstieg der Verschleißhöhe mit zunehmender Flächenpressung festgestellt. Dieser Zusammenhang wird allgemein über eine Potenzfunktion nach Gleichung (3.22) beschrieben. Darin ist $h_{V,0}$ die Verschleißhöhe bei Bezugs-Flächenpressung $p_{N,0}$.

$$h_V = h_{V,0} \cdot \left(\frac{p_N}{p_{N,0}} \right)^n \quad (3.22)$$

Gäbel et al.¹⁴¹ erklären den Anstieg des Verschleißes mit der Flächenpressung damit, dass zum einen die Anzahl der lokalen Kontaktstellen mit zunehmender Last pro Fläche

¹³⁸ Grosch: Rubber Abrasion and Tire Wear, 2006, S. 546

¹³⁹ Grosch: Rubber Abrasion and Tire Wear, 2006, S. 547

¹⁴⁰ Grosch: Rubber Abrasion and Tire Wear, 2008, S. 472

¹⁴¹ Gäbel et al.: Lokale Effekte zwischen Reifen und Fahrbahn, 2008, S. 563

zunimmt und zum anderen die Kontaktfläche an den bereits vorhandenen Kontaktstellen ansteigt.

Da angenommen wird, dass sich bei zunehmender Radlast auch der Latsch vergrößert und dadurch die Flächenpressung innerhalb der Belastungsgrenzen des Reifens annähernd konstant in Abhängigkeit des Reifeninnendruckes bleibt¹⁴², wird nicht davon ausgegangen, dass sich der Verschleiß auch überproportional mit der Radlast erhöht, sondern proportional mit der Zunahme der Fläche. Mit dem Zusammenhang $p_N = F_z/A$ und der elliptischen Aufstandsfläche $A = \pi \cdot b_L \cdot l_L$ wird Gleichung (3.22) geschrieben als:

$$h_V = h_{V,0} \cdot \left(\frac{F_z}{A \cdot p_{N,0}} \right)^n = h_{V,0} \cdot \left(\frac{p_N}{p_{N,0}} \right)^{n-1} \cdot \frac{F_z}{\pi \cdot l_L \cdot b_L \cdot p_{N,0}} \quad (3.23)$$

Gleichsetzen von Gleichung (3.21) und (3.23) ergibt somit die Verschleißrate γ in Abhängigkeit der Flächenpressung und der Latschlänge l_L .

$$\gamma = \frac{h_{V,0}}{\mu \cdot \pi \cdot l_L} \cdot \frac{p_N^{n-1}}{p_{N,0}^n} \quad (3.24)$$

Dies würde bedeuten, dass die Verschleißrate bei konstanter Flächenpressung mit zunehmender Länge der Kontaktfläche abnimmt

3.4.2 Optische Einflussgrößen

Im Kontext der Spurzeichnungssensitivität werden als optische Einflussgrößen die Größen bzw. Eigenschaften verstanden, die bei einer gegebenen Verschleißhöhe die tatsächliche Intensität der Reifenspurspur als messbaren Kontrast auf der Fahrbahn beeinflussen. Da aus der Literatur bisher keine Quellen bekannt sind, die sich mit der optischen Erscheinung von Reifenabrieb auseinandersetzen, werden mögliche Einflussgrößen aus einer Modellvorstellung zur Schwärzung der Fahrbahn aufgrund von Reifenabrieb abgeleitet. Es wird angenommen, dass der Mechanismus, der zur Schwärzung der Fahrbahn aufgrund abgeriebener Reifenpartikel führt, dem Rasterdruckverfahren ähnlich ist. Das Rasterdruckverfahren beruht auf den Prinzipien des menschlichen Sehens, nach denen einzelne Bildpunkte, deren Abstand kleiner als die Auflösungsgrenze des menschlichen Auges ist, zu einem Gesamtreiz „verschmelzen“¹⁴³. Die Auflösungsgrenze und damit der maximale Durchmesser d einer Rasterzelle, richtet sich nach dem Grenzwinkel des menschlichen Auges von einer Bogenminute¹⁴⁴ und dem Betrachtungsabstand r nach Gleichung (3.25).

$$d = \frac{2\pi r}{21600} \quad (3.25)$$

¹⁴² Zeller: Handbuch Fahrzeugakustik, 2009, S. 224

¹⁴³ Simon: Farbe im Digitalen Publizieren, 2007, S. 144

¹⁴⁴ $360^\circ = 21600$ Bogenminuten

Die verschiedenen Farbabstufungen zwischen der Farbe des Untergrunds und der Farbe des Druckpunkts zur Darstellung von Halbtönen werden entweder über die Größe der Rasterpunktform (Amplitudenmodulation) oder der Anzahl der Rasterpunkte (Frequenzmodulation) in der Zelle eines Druckrasters erzeugt. Zusätzlich kann auch über die Intensität der Druckpunkte eine Abstufung vorgenommen werden¹⁴⁵. Dies ist beispielhaft in Abbildung 3.10 dargestellt. In den drei Abbildungen sind jeweils 10 x 5 Rasterzellen vorhanden, die eine bestimmte Anzahl an Druckpunkten enthalten. Bei der Amplitudenmodulation werden die Punkte im Zentrum der Rasterzelle angeordnet, während diese bei der Frequenzmodulation zufällig im Raster verteilt sind. Bei der Intensitätsmodulation werden echte Halbtöne über die Schichtdicke der Druckpunkte realisiert. Da die Abstufung aufgrund diskreter Schichtdicken nicht beliebig fein erfolgen kann, wird das intensitätsmodulierte Verfahren zur Erzeugung von feineren Abstufungen mit den anderen beiden Verfahren kombiniert.

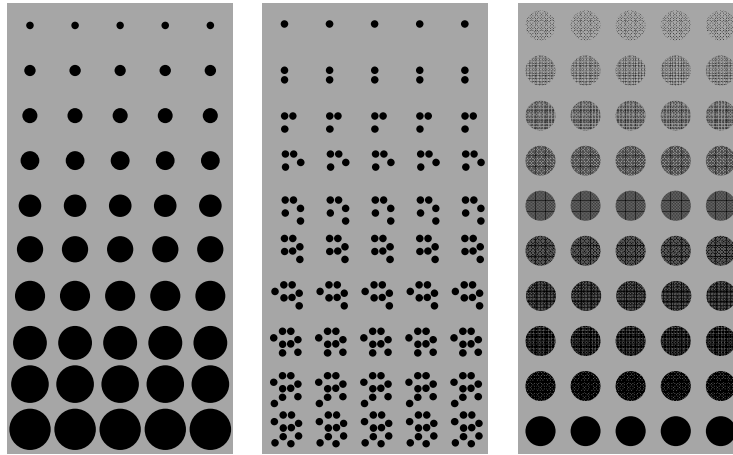


Abbildung 3.10: Halbtondarstellung mittels amplitudenmodulierter (links), frequenzmodulierter (Mitte) und intensitätsmodulierter (rechts) Rasterung.

Der resultierende Grauwert G ergibt sich dabei aus dem Flächenanteil A_{cov}/A der Druckpunkte in der Rasterzelle nach Gleichung (3.26). Darin ist G_{Dot} der Grauwert der Rasterpunkte und G_{Bg} der Grauwert des Untergrundmediums.

$$G = G_{Bg} + \frac{A_{cov}}{A} (G_{Dot} - G_{Bg}) \quad (3.26)$$

Im Falle der Amplituden- und Frequenzmodulation ändert sich das Verhältnis von A_{cov}/A bei konstantem Grauwert G_{Dot} der Rasterpunkte, während bei der Intensitätsmodulation der Grauwert der Druckpunkte bei konstanter Flächendeckung variiert wird.

Bei der Entstehung von Reifenspuren wird eine Kombination der drei Prinzipien angenommen, da sich sowohl die Anzahl an Abriebspartikeln, als auch deren Größe und Schichtdicke ändert. Für die Wahrnehmung von Reifenspuren als Schwärzung der Fahrbahn unterschiedlicher Abstufungen wird davon ausgegangen, dass der Abstand der Verschleißpartikel einem Bruchteil der nach Gleichung (3.25) berechneten Auflösungs-

¹⁴⁵ Simon: Farbe im Digitalen Publizieren, 2007, S. 145 ff.

grenze entspricht. Während sich die Grauwerte G_{Dot} der Druckpunkte aus der Schichtdicke aufgrund übereinander liegender Partikel ergeben, resultiert der wahrgenommene Grauwert G der gesamten Rasterzelle aus der Konzentration der Druckpunkte des jeweiligen Grauwerts und der Grauwerte G_{Bg} des Untergrunds nach Gleichung (3.26).

Unter Annahme einer homogenen Verteilung des Verschleißvolumens auf die Rasterzelle der Fläche A ergibt sich eine konstante Schichtdicke, die der Verschleißhöhe h_V entspricht. Mit zunehmender Schichtdicke nimmt auch die optische Dichte D_{opt} (3.27) der Schicht aufgrund der Abnahme des Remissionsgrades τ (3.28) zu. Dieser beschreibt das Verhältnis von zurückgestrahlter Lichtintensität I des Untergrundes mit der Farbschicht zu der zurückgestrahlten Lichtintensität I_0 des Untergrundes ohne die Farbschicht¹⁴⁶.

$$D_{opt} = -\log \tau \quad (3.27)$$

$$\tau = \frac{I}{I_0} \quad (3.28)$$

Der Zusammenhang zwischen optischer Dichte und Farbschichtdicke wird beispielsweise in der Densitometrie zur Bestimmung der Druckqualität genutzt¹⁴⁷. Bis zu einer bestimmten Schichtdicke wird die Zunahme der optischen Dichte als nahezu konstant angenommen. Darüber hinaus nähert sich die Dichte der Farbschicht asymptotisch einer maximalen Grenzdichte D_{max} an. Dieser Zusammenhang wird allgemein mit dem Regressionskoeffizienten C durch die empirisch gefundene Formel¹⁴⁸ nach Tollenaar und Ernst¹⁴⁹ in Gleichung (3.29) beschrieben.

$$D_{opt}(h_V) = D_{max} (1 - e^{-C \cdot h_V}) \quad (3.29)$$

Das Verhältnis χ des sich ergebenden Halbtönen zum Vollton hängt über die sogenannte „Murray-Davies“-Gleichung¹⁵⁰ (3.30) mit der optischen Dichte D_{opt} der betrachteten Fläche in Abhängigkeit der optischen Dichte D_I des Volltons auf dem entsprechenden Untergrund zusammen.

$$\chi = \frac{1 - 10^{-D_{opt}(h_V)}}{1 - 10^{-D_I}} \quad (3.30)$$

Der Grauwert G_{Dot} berechnet sich damit entsprechend der Gleichung (3.31) mit dem Grauwert G_I des Volltons und dem Grauwert G_{Bg} des Untergrunds.

$$G_{Dot} = G_{Bg} + (G_I - G_{Bg}) \cdot \chi \quad (3.31)$$

Da in der Realität nicht von einer Gleichverteilung der Partikel, sondern eher einer stochastischen Verteilung ausgegangen wird, variieren auch die Farbwerte der einzelnen Punkte der Rasterfläche, da an einigen Stellen keine Partikel haften, während an ande-

¹⁴⁶ vgl. Hafner: Vorlesung Drucktechnik - Rasterung und Mehrfarbendruck, 2011, S. 28

¹⁴⁷ Dörsam: Praktische Farbmessung / Farbwissenschaften in der Papiertechnik, 2011, Kap. 11, S. 35 ff.

¹⁴⁸ Xu et al.: Study of Ink Mileage Curve of Gravure Printing, 2006, S. 3

¹⁴⁹ Tollenaar et al.: Optical Density and Ink Layer Thickness, 1962

¹⁵⁰ Murray: Monochrome Reproduction in Photoengraving, 1936

ren Stellen mehrere Partikel aufeinander liegen. Wird eine Normalverteilung der auftretenden Grauwerte angenommen, so ergibt sich der resultierende Grauwert G der Rasterfläche wiederum als Mittelwert sämtlicher Grauwerte $G_{Bg,m}$ des Untergrunds und $G_{Dot,m}$ der Verschleißpartikel nach Gleichung (3.26). Der Mittelwert der Grauwerte der Verschleißpartikel $G_{Dot,m}$ wird als der Wert angenommen, der sich bei Gleichverteilung der Partikel mit homogener Schichtdicke h_V nach Gleichung (3.32) ergibt.

$$G_{Dot,m} = G_{Bg,m} + (G_1 - G_{Bg,m}) \cdot \frac{1 - 10^{-D_{opt}(h_V)}}{1 - 10^{-D_1}} \quad (3.32)$$

Das Verhältnis der mit Reifenpartikeln des Grauwerts $G_{Dot,m}$ bedeckten Fläche A_{cov} zur betrachteten Rasterfläche A wird als abhängig von der Größe der Verschleißpartikel und der Anzahl der Kontaktstellen und damit der Fahrbahnstruktur angenommen

Für eine konstante Flächendeckung $A_{cov}/A < 1$ ergibt sich damit in Gleichung (3.33) der Grauwert der betrachteten Fläche A in Abhängigkeit der Verschleißhöhe h_V .

$$G(h_V) = G_{Bg} + \frac{A_{cov}}{A} \cdot \frac{1 - 10^{-D_{max}(1 - e^{-C \cdot h_V})}}{1 - 10^{-D_1}} (G_1 - G_{Bg}) \quad (3.33)$$

Für die Betrachtung von Reifenspuren an der Sichtbarkeitsgrenze mit entsprechend geringen Verschleißhöhen wird ein annähernd konstanter Zusammenhang zwischen dem resultierenden Grauwert der betrachteten Fläche und der Verschleißhöhe angenommen. Aus der Linearisierung von Gleichung (3.33) um den Ursprung folgt Gleichung (3.34).

$$G(h_V) = G_{Bg} (1 - \xi \cdot h_V) \quad (3.34)$$

Der Anstieg der Geradengleichung wird zur Schwärzungsrate ξ nach Gleichung (3.35) zusammengefasst.

$$\xi = \frac{G_{Bg} - G_1}{G_{Bg}} \cdot \frac{A_{cov}}{A} \cdot \frac{C \cdot \ln(10) D_{max}}{1 - 10^{-D_1}} \quad (3.35)$$

Als Einflussfaktoren auf die Schwärzungsrate wird die Färbung des Reifens G_1 und dessen optische Dichte D_1 und D_{max} , die Färbung der Fahrbahn G_{Bg} , und die Flächendeckung aufgrund der Mikrostruktur der Fahrbahn und der Verschleißform abgeleitet.

Nach dem Verständnis der Intensität einer Reifenspur als Kontrast zur Fahrbahn wird die tatsächliche Intensität im Folgenden nicht alleine über ihren Grauwert, sondern das Kontrastverhältnis K zum Grauwert der Fahrbahn nach Gleichung (3.36) beschrieben.

$$K = \frac{G_{Bg} - G(h_V)}{G_{Bg}} = \xi \cdot h_V \quad (3.36)$$

3.4.3 Ableitung einer Kenngröße

Durch Einsetzen von Gleichung (3.21) in (3.36) ergibt sich der Kontrast der Reifenspur als Funktion der Reibkraft in Abhängigkeit der Verschleiß- und Schwärzungsrate, die zusammenfassend mit der Spurzeichnungssensitivität ζ beschrieben wird und den Rei-

fen- und Fahrbahneinfluss zusammenfasst. Da die Spurzeichnungssensitivität nicht grundsätzlich als Konstante angenommen werden kann, beschreibt sie ganz allgemein die Übertragungsfunktion zwischen breitenbezogener Reibkraft und Spurkontrast.

$$K = \xi \cdot h_v = \xi \cdot \gamma \cdot \frac{F_R}{b_{eff}} = \zeta \cdot \frac{F_R}{b_{eff}} \quad (3.37)$$

3.5 Sichtbarkeit

Aus der Betrachtung der optischen Einflussgrößen auf die Spurzeichnungssensitivität wird deutlich, dass die Schwärzung der Fahrbahn physikalisch gesehen auf die Veränderung der Remission des Lichts an der Stelle der Spurzeichnung im Verhältnis zur unkontaminierten Fahrbahnfläche zurückgeht. Daneben handelt es sich auch nicht um eine durchgängig gefärbte Fläche, sondern um einzelne Farbpunkte, die in Abhängigkeit ihrer Flächendichte und des Betrachtungsabstandes nach Gleichung (3.25) als einheitlich geschwärzte Fläche wahrgenommen werden.

Aus der Modellbetrachtung und den aus der Literatur bekannten Einflussfaktoren auf die wahrgenommene Sichtbarkeit (vgl. Kapitel 2.1.3) wird der Zusammenhang zwischen tatsächlicher Intensität, als maximaler Kontrast K_{max} unter optimalen Sicht- und Lichtbedingungen, und gemessener Intensität, als Kontrast unter gegebenen Sicht- und Lichtbedingungen, ganz allgemein über den Sichtbarkeitsfaktor κ (3.38) beschrieben.

$$\kappa = \frac{K_{eff}}{K_{max}} \quad (3.38)$$

Da die Lichtintensität, die sowohl von den anhaftenden Partikeln auf der Fahrbahn als auch von der Fahrbahn selber zum Betrachtungspunkt zurückgestrahlt werden, von der eigentlichen Lichtmenge, der Lichtrichtung, dem Abstand und der Richtung des Betrachtungspunktes sowie den Reflektionseigenschaften der Fahrbahn abhängen, werden diese als Haupteinflussfaktoren auf den die Sichtbarkeit bestimmenden Faktor κ bei konstanter tatsächlicher Intensität gesehen. Der Faktor wird als konstant angenommen, wenn die Betrachtungs- und Lichtverhältnisse konstant gehalten werden. Die Kontrastwerte beziehungsweise Spurzeichnungssensitivitäten werden daher nur als unter den gegebenen Aufnahme- beziehungsweise Beobachtungsbedingungen gültig angenommen. Daraus folgt der Zusammenhang zwischen tatsächlicher und gemessener Spurzeichnungssensitivität ζ_{eff} nach Gleichung (3.39).

$$\zeta_{eff} = \kappa \cdot \zeta_{max} \quad (3.39)$$

3.6 Zwischenfazit

Das vorgestellte Modell zur Reifenspurentstehung an der Sichtbarkeitsgrenze nimmt grundsätzlich einen proportionalen Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Intensität einer Reibspur und der Verschleißhöhe an. Im Falle einer konstanten Spurzeichnungssensitivität einer gegebenen Reifen- und Fahrbahnkombination, als Produkt aus Verschleiß- und Schwärzungsrate, wird die Verschleißhöhe als proportional zur Reibkraft über der Breite der Reibfläche angenommen. Die Reibkraft setzt sich wiederum aus der Höhe der resultierenden Führungskraft am Reifen und dem resultierenden Gleitschlupf zusammen und ist für reinen Deformationsschlupf gleich Null. Nach der Modellvorstellung lässt sich die Beziehung zwischen der breitenbezogenen Reibkraft und der Intensität nur dann feststellen, wenn die Licht- sowie Betrachtungsbedingungen, unter der der Spurkontrast bestimmt wird, konstant gehalten werden. Ist dies der Fall, so ließe sich bei einer Bewährung des Modells alleine aus dem Kontrast einer Spur bei bekannter Spurzeichnungssensitivität auf die Höhe der Reibkraft zurückschließen. Eine weitere Differenzierung hinsichtlich der Höhe der Radlast, des Längsschlupfs, des Schräglaufwinkels oder des Reibwerts ist nach den getroffenen Annahmen nicht möglich. Da die Voraussetzung für die Entstehung von Reifenspuren das Auftreten von Gleitschlupf im Reifenlatsch ist, kann jedoch eine Untergrenze hinsichtlich des resultierenden Schlupfs bei bekannter Reifencharakteristik bestimmt werden.

4 Methodik

4.1 Zentraler Ansatz der Untersuchung

Ziel der Arbeit ist die Beantwortung der Frage ob und unter welchen Bedingungen die Intensität beziehungsweise das Auftreten sichtbarer Reifenspuren einen Rückschluss auf fahrdynamisch relevante Parameter zulassen. Aus dem Stand der Forschung und Technik ist ein physikalisch motiviertes Modell entwickelt worden, aus dem die folgende Haupthypothese abgeleitet ist:

H 1.0 *Der Kontrast einer Reibspur nimmt bei konstanter Spurzeichnungssensitivität von Reifen und Fahrbahn und unter konstanten Sicht- und Lichtbedingungen monoton mit dem Quotienten aus Reibkraft und Reibbreite zu.*

Eine Falsifikation der Haupthypothese führt zu einer negativen Beantwortung der grundsätzlichen Fragestellung. Eine Überprüfung der universellen Hypothese mittels eines Falsifikationsansatzes setzt nach Popper¹⁵¹ deren Falsifizierbarkeit voraus. Die existentielle Hypothese H 1.1 als logische Negation des Allsatzes H 1.0, deren Verifikation die aufgestellte Haupthypothese falsifizieren würde, lautet:

H 1.1 *Es gibt mindestens einen Fall, bei dem der Kontrast einer Reibspur bei konstanter Spurzeichnungssensitivität und unter konstanten Sicht- und Lichtbedingungen nicht mit dem Quotienten aus Reibkraft und Reibbreite monoton zunimmt.*

Die Voraussetzungen für eine Verifikation der existentiellen Hypothese sind die Kontrolle der Reibkraft, der Spurzeichnungssensitivität sowie der Sicht und Lichtbedingungen und die objektive Bestimmbarkeit des Spurkontrasts. Weiterhin muss die Höhe des Messfehlers der erfassten Größen bekannt sein, da sich daraus der Toleranzbereich ableitet, innerhalb dem Monotonie gefordert ist.

Der zentrale Ansatz der Untersuchung besteht daher in der möglichst isolierten Untersuchung der einzelnen Einflussfaktoren, welche sich entsprechend der Modellbildung in drei disjunkte Kategorien unterteilen und durch die vorgestellten Kenngrößen nach Abbildung 4.1 beschrieben werden. Die Überprüfung der getroffenen Modellannahmen und Einflussfaktoren erfordert die Verwendung von Versuchswerkzeugen, die eine möglichst unabhängige Untersuchung der jeweiligen Kenngröße unter kontrollierten Bedingungen ermöglichen.

¹⁵¹ Popper: Logik der Forschung, 1994

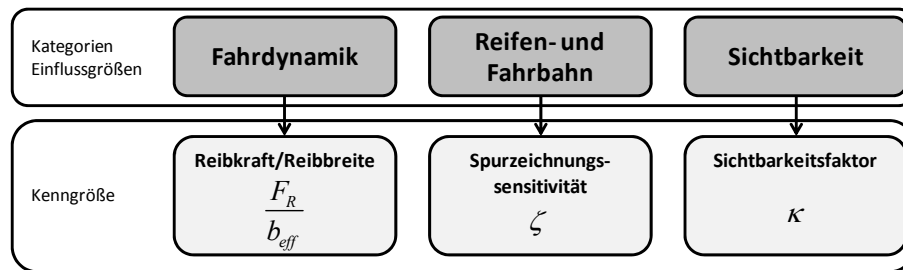


Abbildung 4.1: Kategorisierung der Einflussfaktoren und deren beschreibenden Kenngrößen

Die Grundvoraussetzung für die Untersuchung von Einflussgrößen auf den Kontrast einer Reibspur ist die objektive und reliable Bestimmung der Intensität bei konstantem Sichtbarkeitsfaktor. Diese Voraussetzung ist dann erfüllt, wenn der Kontrastwert einer Spur konstanter Intensität bei wiederholter und zeitnaher Messung innerhalb einer geringen Varianz reproduzierbar ist.

Da sich die Spurzeichnungssensitivität aus der Verschleiß- und Schwärzungsrate zusammensetzt, ist die Annahme einer konstanten Spurzeichnungssensitivität identisch mit der Annahme einer konstanten Verschleiß- und Schwärzungsrate bei konstantem Sichtbarkeitsfaktor. Es stellt sich daher die Frage, unter welchen Bedingungen diese Annahme gültig ist. Aus dem Stand der Forschung und Technik ist bekannt, dass die Verschleißrate Temperatur- und flächenpressungsabhängig ist sowie von den Reifen- und Fahrbahneigenschaften abhängt. Letzteres wird auch für die Schwärzungsrate angenommen. Von einer konstanten Spurzeichnungssensitivität kann daher nur ausgegangen werden, wenn die Zunahme des Kontrastes mit der breitenbezogenen Reibkraft innerhalb des Messfehlers der Kontrast- und Reibkraftbestimmung über einen linearen Zusammenhang beschrieben werden kann.

Die Validität der Berechnung der breitenbezogenen Reibkraft aus den am Rad messbaren Größen nach den aufgeführten Gleichungen ist dann gegeben, wenn die Kontrastwerte der erzeugten Spuren bei den der berechneten Reibkraft äquivalenten Schlupf- und Radlastwerten innerhalb des Toleranzbereiches dem Kontrast von Spuren bei gemessener gleicher Reibkraft entsprechen.

4.2 Versuchswerkzeuge

4.2.1 Reifenmessenanhänger PETRA

Zur Untersuchung der fahrdynamischen Einflussgrößen wird der Reifenmessenanhänger PETRA¹⁵² (Personenwagen-Reifen-Traktions-Messenanhänger) eingesetzt. Dieser erlaubt die unabhängige Variation von Schräglaufwinkel, Längsschlupf, Radlast und Fahrzeug-

¹⁵² vgl. Bachmann: Wechselwirkungen im Prozeß der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn, 1998, S. 14 ff.

geschwindigkeit. Der grundsätzliche Aufbau von PETRA ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

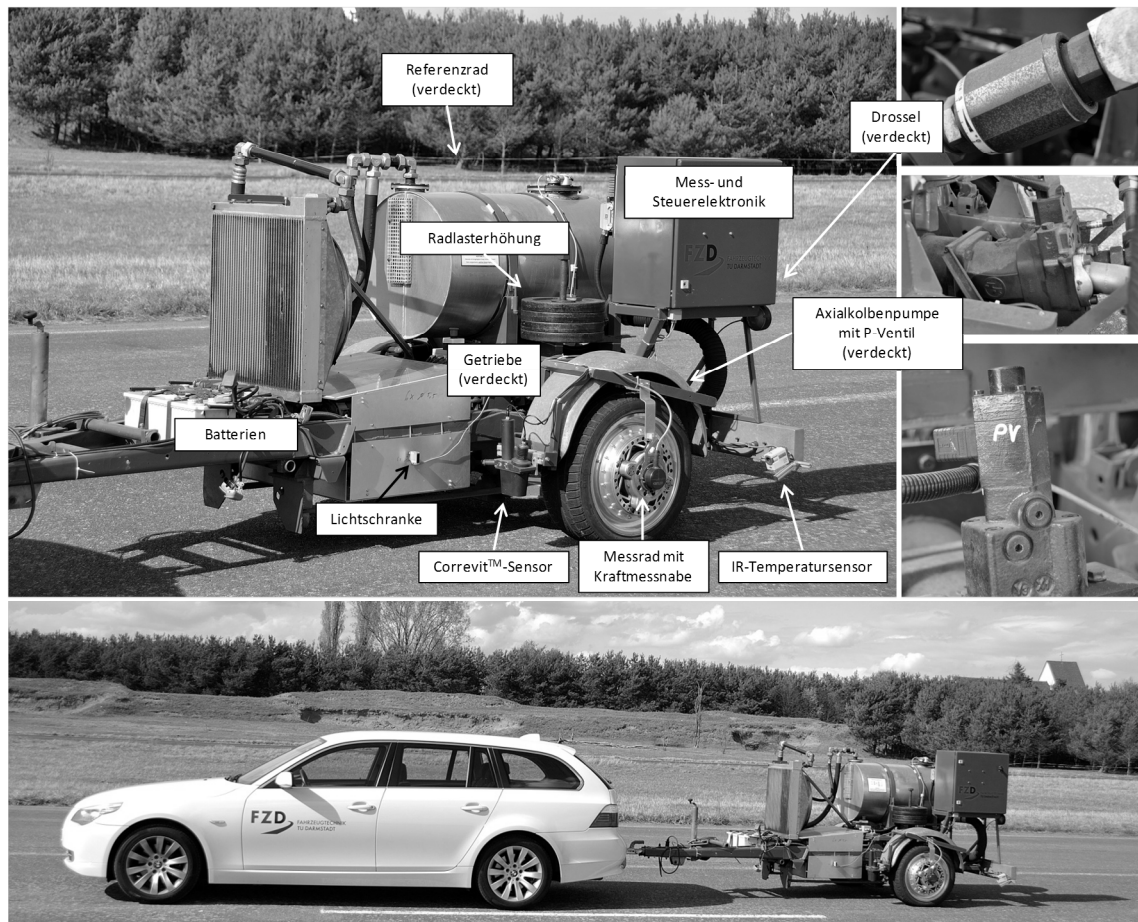


Abbildung 4.2: Reifenmessanhänger Petra

Das Messrad auf der in Fahrtrichtung linken Seite ist über ein sechsstufiges, manuelles Vorgelegegetriebe mit einer Axialkolbenpumpe verbunden. Die Pumpe fördert, angetrieben durch das Messrad, Hydrauliköl gegen eine Drossel. Da die Pumpendrehzahl in einem festen Übersetzungsverhältnis (je nach eingelegtem Gang des Getriebes) zu der Raddrehzahl steht, stellt sich stationär die Pumpendrehzahl beziehungsweise Raddrehzahl ein, bei der das Pumpenmoment M_{Pump} mit dem über das Messrad übertragbare Bremsmoment M_B im Gleichgewicht steht. Da die Anhängergeschwindigkeit durch das Zugfahrzeug annähernd konstant gehalten wird, stellt sich ein entsprechender Bremschlupf am Messrad ein. Der parabolische Momenten-Drehzahl-Verlauf der Pumpe (dargestellt in Abbildung 4.3) ändert sich in Abhängigkeit der Fördervolumens V_{Pump} , das über ein Proportionalventil gesteuert wird. Dadurch wird die Lage der stationären Betriebspunkte und damit des sich einstellenden Schlupfs verändert. Im Gegensatz zu einer konventionellen Reibungsbremse lassen sich dadurch auch stationäre Schlupfwerte im instabilen Bereich der μ -Schlupf-Kurve erreichen.

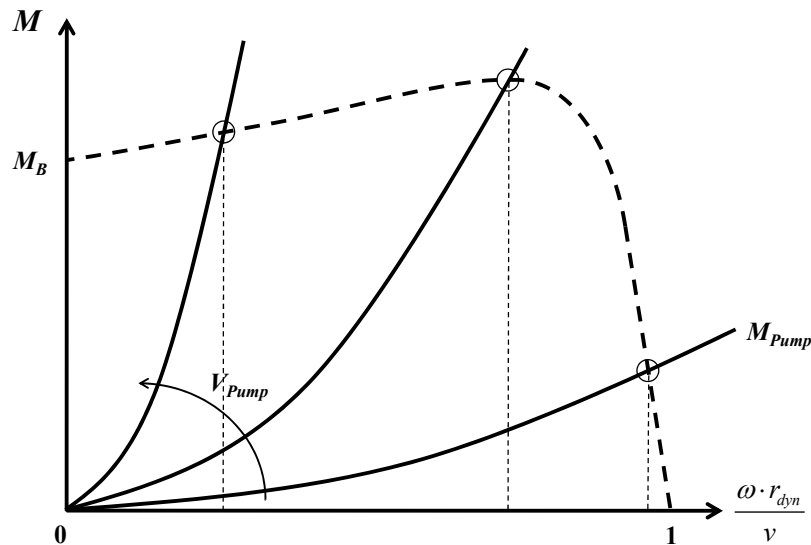


Abbildung 4.3: Stationäre Betriebspunkte in Abhängigkeit der Pumpenkennlinie und des übertragbaren Bremsmoments M_B

Die Variation des Schräglaufwinkels am Messrad erfolgt über einen Elektromotor, der einen entsprechenden Lenkwinkel einstellt. Durch das (ungebremte) Referenzrad auf der anderen Seite des Anhängers, dessen Lenkung unabhängig von dem Messrad über einen zweiten Aktor erfolgt, wird ein sich einstellender Schwimmwinkel bei einseitigem Bremsen beziehungsweise Lenken des Messrades durch ein entgegen gerichtetes Giermoment kompensiert. Die Regelung nutzt dabei das Geschwindigkeitssignal des CorrevitTM-Sensors, der fest zur Radmittelebene fixiert ist. Weicht der Winkel des resultierenden Geschwindigkeitsvektors von dem Sollwert des Schräglaufwinkels innerhalb einer bestimmten Toleranz ab, wird der Lenkwinkel des Referenzrades entsprechend korrigiert. Die Variation der Radlast erfolgt durch bis zu acht Massescheiben (je 20 kg), die in der Nähe des Messrades auf einer Gewindestange gestapelt werden. Der Variationsbereich von PETRA ist in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Variationsbereich von PETRA¹⁵³

Variationsgröße	Wertebereich
Geschwindigkeit	max. 90 km/h
Längsschlupf	0 - 90 %
Schräglaufwinkel	$\pm 8^\circ$ ¹⁵⁴
Sturzwinkel	$\pm 5^\circ$
Radlast	4,6 - 5,8 kN ¹⁵⁴
Reifendimension	14 - 17", 175 - 225 mm

¹⁵³ vgl. Klempau: Untersuchungen zum Aufbau eines Reibwertvorhersagesystems im fahrenden Fahrzeug, 2003, S. 43

¹⁵⁴ Quelle: Eigene Messung

Neben dem CorrevitTM-Sensor zur Erfassung des Betrags und der Richtung der Radnabengeschwindigkeit über Grund relativ zur Radmittelebene, wird die Raddrehzahl des Messrades über einen Inkrementalgeber gemessen. Die Kräfte und Momente am Rad werden mittels einer Mehrkomponentenmessfelge erfasst. Daneben besteht die Möglichkeit der indirekten Messung der Bremskraft über eine Kraftmessdose am drehbar um die Querachse gelagerten Getriebe. Dabei wird die Umfangkraft an der Welle aus dem Abstützmoment des Getriebes mit Kenntnis des Hebelarms zwischen Drehachse des Getriebes und Messdose berechnet. Ein Infrarot-Temperatursensor, der sich hinter dem Messrad befindet, misst die Reifentemperatur circa 1 cm oberhalb des Reifenlatschs. Die technischen Daten der Sensorik sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Tabelle 4.2: Sensorik von PETRA

Sensor	Messgröße	Messbereich	Auflösung
Datron V2 Correvit-Sensor	Wegdifferenz	-	k.A.
	Geschwindigkeit	0,25 - 250 km/h	
	Bewegungsrichtung	$\pm 40^\circ$	
Pepperl & Fuchs TRD-J-1000 Drehzahlsensor	Raddrehwinkel, Raddrehzahl	-	0,36° (1000 Inkremente)
Kistler KST 223000 Messfelge	Längskraft	± 20 kN	20 N
	Querkraft	± 15 kN	15 N
	Vertikalkraft	0 - 20 kN	20 N
	Moment um die x-Achse	± 6 kNm	
	Moment um die y-Achse	± 6 kNm	
	Moment um die z-Achse	$\pm 2,5$ kNm	
ASM BA-30TV IR-Sensor	Temperatur	0 - 500 °C	0,2 °C
SICK WL12-2P-130-Lichtschanke	Licht-Reflektions-Impuls		1,5 kHz
HBM U2 Kraftmessdose	Axialkraft	< 491 N	k.A.

4.2.2 Mobiler Linearprüfstand VERINA

Bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen breitenbezogener Reibkraft und Spurintensität mit einem schlüpfenden Reifen (beispielsweise mit PETRA) besteht grundsätzlich die Problematik, dass sowohl die Reibkraft als auch die Reibbreite nicht direkt gemessen, sondern modellbasiert aus der Umfangskraft und dem Schlupf an der Felge sowie den statischen Messungen der Aufstandsflächen berechnet werden. Die mit der Reifensteifigkeit berechnete Reibgeschwindigkeit und Normalkraft stellen dabei integrale Größen dar, allerdings ändert sich aufgrund der Deformation des Reifens die Gleitgeschwindigkeit über die Latschlänge, und auch die Normalkraft ist aufgrund der zur Latschmitte hin zunehmenden Abplattung des Reifens nicht überall gleich hoch. Eine genaue Bestimmung, welcher Teil des Latsches unter welchen Reibparametern eine Spur zeichnet, ist mit dem Reifenmessanhänger nicht möglich. Aus diesem Grund

wird die Spurzeichnungssensitivität mit dem zu diesem Zweck entwickelten linearen Reibprüfstand VERINA¹⁵⁵ (Versuchseinrichtung zur Reifenspur-Intensitäts-Analyse) unter Verwendung von Reifenprofilausschnitten untersucht. Dies ermöglicht eine relativ genaue Bestimmung der am einzelnen Profilausschnitt wirkenden Kräfte und Geschwindigkeiten. Die Hauptfunktion der Versuchseinrichtung besteht in der translatorischen Bewegung eines Reifenprofilausschnitts unter Variation der Normalkraft und Gleitgeschwindigkeit.

Die Versuchseinrichtung, die in Abbildung 4.4 dargestellt ist, unterteilt sich in die eigentliche Versuchseinheit, die aus einem Rahmen und dem darauf verfahrenen Schlitten besteht, und der Steuerungs- und Messeinheit.

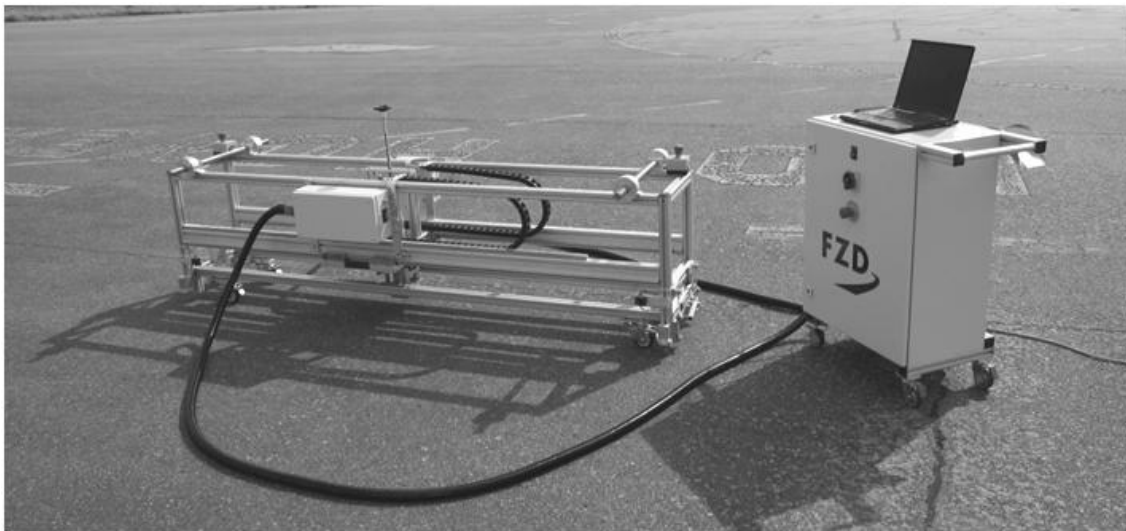


Abbildung 4.4: Reibprüfstand VERINA

Der Rahmen steht im Versuchsbetrieb fest auf der Fahrbahn. Um ein Verrutschen des Rahmens aufgrund der Reibkraft des Profilelements zu verhindern, kann das Grundgewicht des Prüfstands (ca. 1,2 kN) zusätzlich über Gewichtsscheiben erhöht werden.

Zum Transport bzw. zum Verfahren der Versuchseinheit auf der Fahrbahn ist ein Rahmen mit Rollen über einen Hebelmechanismus mit dem Rahmengestell verbunden. Durch Betätigung des Hebelmechanismus wird das Rahmengestell angehoben und die Versuchseinheit kann auf den Rollen verschoben werden. Die netzunabhängige Stromversorgung erfolgt über einen Benzingenerator.

Abbildung 4.5 zeigt die wesentlichen Komponenten der Versuchseinheit im Detail. Der Schlitten, der über eine Länge von maximal 1,78 m entlang des Rahmengestells bewegt wird, wird von einem Servomotor auf dem Schlitten über Ritzel und rahmenfeste Zahnstange angetrieben. An dem Schlitten ist eine vertikal schwimmend gelagerte Einheit angebracht, die das Profilelement durch definierte Vorspannung einer Spiralfeder auf die Fahrbahn drückt. Zwischen der Halterung des Profilelements und der Feder befindet sich eine Kraftmessdose, die die Kräfte in alle drei Raumrichtungen misst. Die Gleitge-

¹⁵⁵ vgl. Seipel et al.: Portable Test Facility for Determining Tire-Marking Sensitivity, 2011

schwindigkeit, die der Schlittengeschwindigkeit entspricht, wird über die Motordrehzahl gemessen. An der vorderen Anlagefläche des Profilausschnitts in der Klammerhalterung befindet sich ein Spalt, durch den mit einem IR-Temperatursensor kurz oberhalb der Einlaufkante des Profilelements die Temperatur gemessen wird. Die technischen Daten der Sensorik sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Tabelle 4.3: Sensorik von VERINA

Sensor	Messgröße	Messbereich	Auflösung
ME K3D-120 Kraftsensor	Längskraft	$\pm 1 \text{ kN}$	0,8 N
	Querkraft		
	Vertikalkraft		
Optris CT laser LT	Temperatur	-50 - 975 °C	0,1 °C

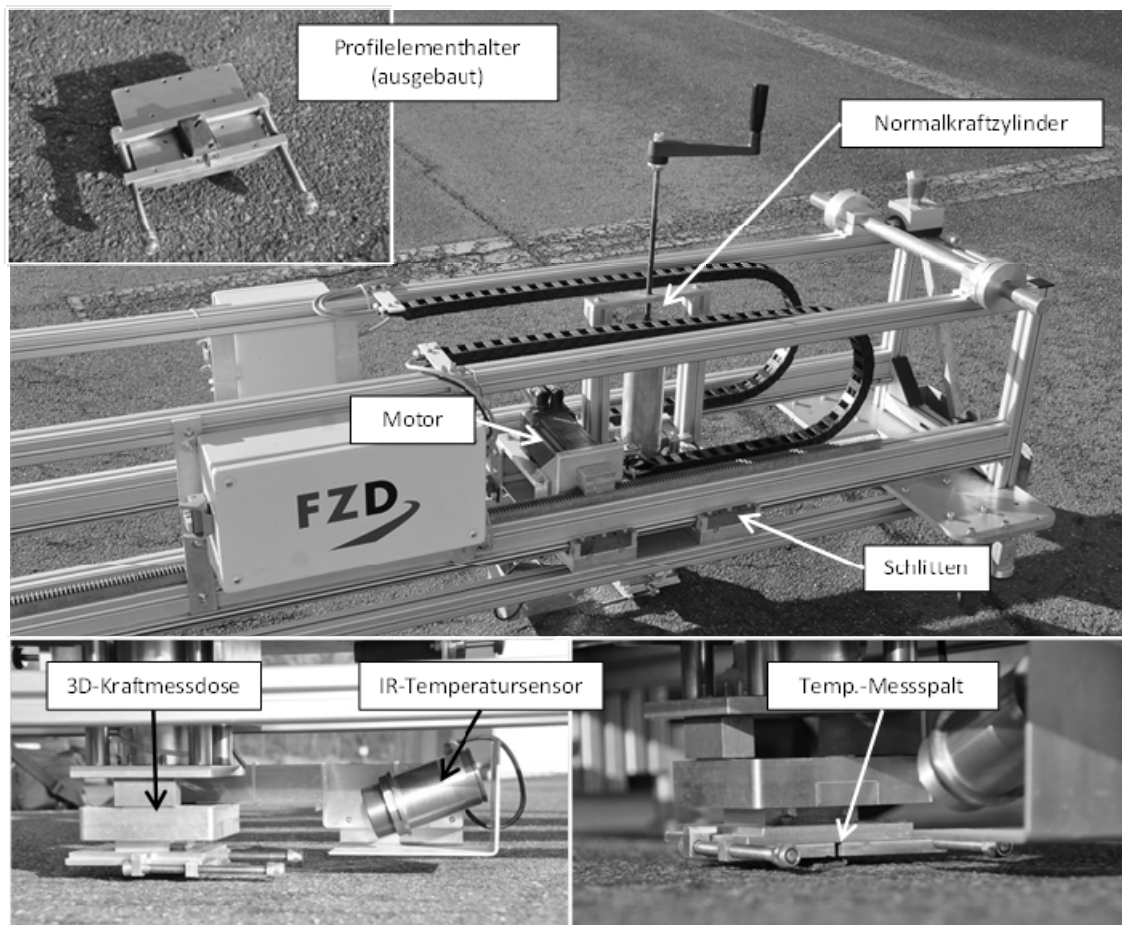


Abbildung 4.5: Reibprüfstand VERINA

Die Profilausschnitte, die bei den Versuchen zum Einsatz kommen, werden mit relativ einfachen Mitteln aus den Reifen mit einer Bandsäge ausgeschnitten. Da hierbei die Schnittqualität deutlich schlechter als zum Beispiel bei der Anfertigung von Reifenschnitten mittels Wasserstrahlschneiden ist, sind die Schnittkanten zum einen nicht parallel und zum anderen uneben aufgrund herausstehender Karkass- und Gürtelfäden (Abbildung 4.6, linkes Bild). Die in Abbildung 4.6 im mittleren Bild dargestellte

Klemmung der Profilelementhalterung ist so ausgeführt, dass zum einen Abweichungen von der ideal rechteckigen Form ausgeglichen werden und zum anderen die Anlagefläche nicht im Bereich der herausstehenden und unnachgiebigen Festigkeitsträger liegt, sondern im Bereich des Laufstreifens. Dadurch wird eine Verbiegung des Profilausschnitts verhindert (Abbildung 4.6, rechtes Bild).

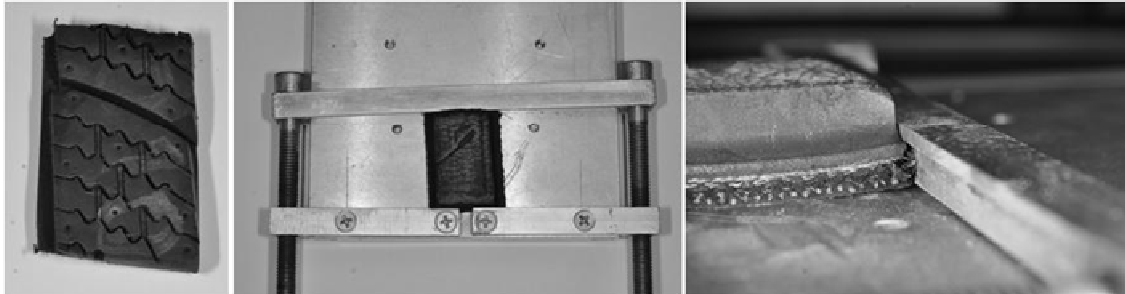


Abbildung 4.6: Beispielhafter Zuschnitt eines Profilelements (links), Ausgleich der nicht parallelen Anlageflächen durch den Profilelementhalter (Mitte) mit Klemmung oberhalb der Festigkeitsträger (rechts).

Der Variationsbereich von VERINA ist in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Tabelle 4.4: Variationsbereich von VERINA

Variationsgröße	Wertebereich
Reibweg	$\leq 1,78 \text{ m}$
Normalkraft	60 N - 613 N ¹⁵⁶
Reibgeschwindigkeit	1 mm/s - 3 m/s
Dimension der Profilelemente	10 x 10 - 100 x 100 mm ²

4.2.3 Reifen

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Reifeneigenschaften werden Untersuchungen mit bis zu vier verschiedenen Reifenmodellen durchgeführt. Diese unterschieden sich unter anderem hinsichtlich ihrer Mischungszusammensetzung, ihrer Dimension, ihrer Längs- und Quersteifigkeit, ihrer Profilgeometrie, ihrer Vertikalsteifigkeit und ihres Temperatureinsatzbereiches. Zum Einsatz kommen drei Reifen der Dimension 225/45 R 17 und ein Reifen der Dimension 185/65 R 15. Bei den drei größeren Reifen handelt es sich um einen High-Performance-Sommerreifen, einen Sommerreifen mit Notlaufeigenschaften (verstärkte Seitenwand) und einen Winterreifen. Bei dem kleineren Reifen handelt es sich um einen rollwiderstandsoptimierten Sommerreifen. Abbildung 4.7 zeigt die Versuchsreifen für die Untersuchungen mit dem Reifenmessanhänger PETRA und beispielhaft die entsprechenden Reifenprofilausschnitte, die bei den Untersuchungen mit VERINA zum Einsatz kommen.

¹⁵⁶ Bedingt durch die Federsteifigkeit schwankt die eingestellte Normalkraft in z-Richtung um 2 N/mm aufgrund von Fahrbahnunebenheiten

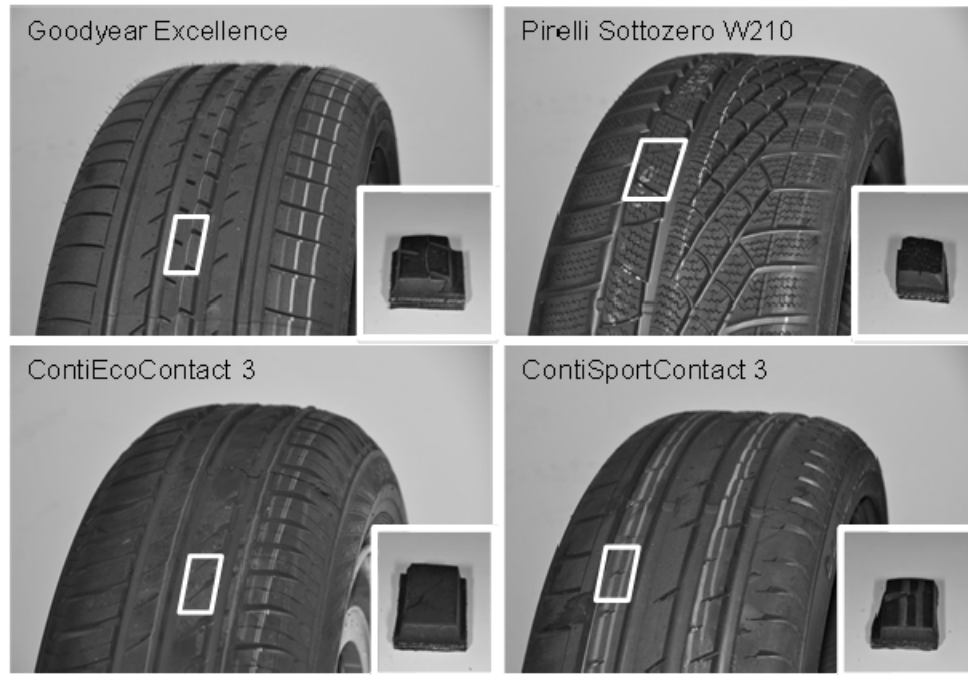


Abbildung 4.7: Versuchsreifen und entsprechende Profilausschnitte.

Eine Übersicht der technischen Daten der verwendeten Versuchsreifen ist in Tabelle 4.5 dargestellt.

Tabelle 4.5: Verwendete Versuchsreifen

Bezeichnung	Hersteller	Reifentyp	Dimension	UTQG-Kenzeichnung		
				Treadwear	Traction	Temperature
ContiSportContact 3 MO	Continental	Sommerreifen	225/45 R 17 91 Y	280	AA	A
ContiEcoContact 3 MO	Continental	Sommerreifen, rollwiderstands- optimiert	185/65 R 15 88 T	280	A	A
Excellence MOE	Goodyear	Sommerreifen, mit Notlaufeigenschaften	225/45 R 17 91 W	240	A	A
Sottozero W210 MO	Pirelli	Winterreifen	225/45 R 17 91 H	-	-	-

Die Dimension der Reifen ist nach ETRTO-Standard (The European Tyre and Rim Technical Organisation) angegeben und bezeichnet eine genormte Reifendimension, in deren Toleranzbereich die tatsächlichen Reifenabmessungen liegen müssen. Darin bezeichnet die erste Zahl die Reifenbreite (in mm), die zweite Zahl das Verhältnis der Höhe des Reifens über der Felge zur Breite (in %), der erste Buchstabe die Reifenbauart

(R = Radialreifen) und die dritte Zahl die Felgendröße (in Zoll). Die letzte Zahl steht für den Load-Index (LI), also die maximal zulässige Radlast, und der letzte Buchstabe für den Speed-Index (SI), also die maximal zulässige Geschwindigkeit. Die UTQG-Kennzeichnung (Uniform Tire Quality Grade) ist von dem DOT (Department of Transportation) der USA definiert und bewertet Reifen relativ zu einem Referenzreifen hinsichtlich Profilverschleiß (Treadwear), Nassgriff (Traction) und Hitzebeständigkeit (Temperature) bei einem standardisierten Testverfahren beziehungsweise -manöver. Sie wird nur bei Pkw-Reifen mit über 13“ Felgendurchmesser und nicht bei Winterreifen angewendet. Bei der Bewertung des Profilverschleißes gibt die Zahl an, um wieviel Prozent der Reifen besser als der Referenzreifen ist. Treadwear 280 bedeutet beispielsweise, dass der Reifen einen um den Faktor 2,8 geringeren Verschleiß zeigt als der Referenzreifen (Treadwear 100) auf dem definierten Testparcours. Die Bewertung für den Nassgriff (Bremsweglänge bei Geradeausbremsung auf nasser Fahrbahn) reicht von AA als Bestnote bis C als Mindestanforderung. Bei der Bewertung der Hitzebeständigkeit, bei der die Temperaturzunahme des Reifens während einer standardisierten Prüfung auf einem Rollenprüfstand gemessen wird, reicht von A als Bestnote bis C als Mindestanforderung an den Reifen.

Der Reifen-Fahrbahn-Reibwert der vier Reifen ist in Abbildung 4.8 als Funktion des Längsschlupfs und in Abbildung 4.9 als Funktion des Querschlupfs aufgetragen. Die dargestellten Kurven basieren auf dem Fitting der experimentell gemessenen Werte mit PETRA mittels „Magic Formula“-Reifenmodell¹⁵⁷ nach Pacejka¹⁵⁸. Die Messungen wurden bei konstanter statischer Radlast von 4,6 kN und einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 30 km/h auf trockener Asphaltfahrbahn des Testgeländes¹⁵⁹ durchgeführt.

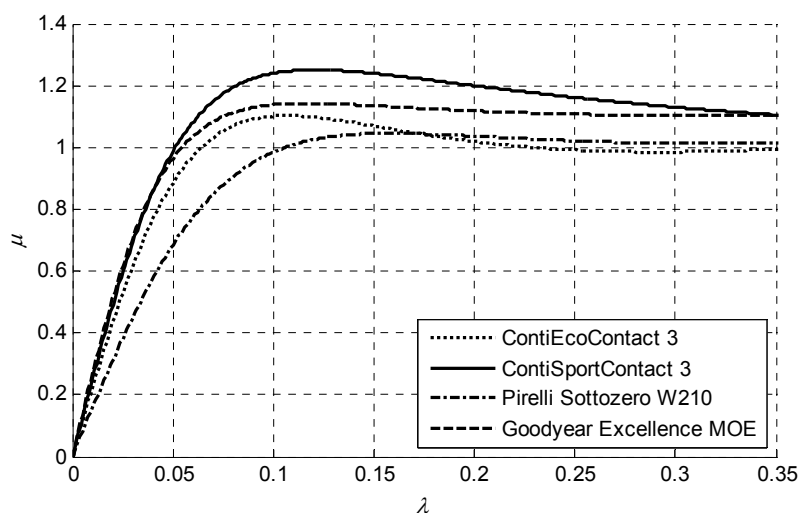


Abbildung 4.8: Reibwert-Längsschlupf-Kurven der Versuchsreifen

¹⁵⁷ vgl. Kapitel 4.3.3

¹⁵⁸ Pacejka: Tire and vehicle dynamics, 2002, S. 6

¹⁵⁹ vgl. Kapitel 4.2.4

In Abbildung 4.8 ist zu erkennen, dass die Längssteifigkeiten des ContiSportContact 3 und des Goodyear Excellence etwa gleich groß ($c_x = 25,8$ beziehungsweise $27,2$) sind, gefolgt von dem ContiEcoContact 3 ($c_x = 22,6$) und dem Pirelli Sottozero mit einer deutlich geringeren Längssteifigkeit ($c_x = 15,9$). Der ContiSportContact 3 erreicht von den vier Reifen auf der Fahrbahn den höchsten maximalen Reibwert von $\mu_{max} = 1,25$ bei 12 % Schlupf. Den kleinsten maximalen Reibwert erreicht der Winterreifen mit $\mu_{max} = 1,05$ bei 16 % Schlupf. Am frühesten erreicht der ContiEcoContact 3 seinen maximalen Reibwert von $\mu_{max} = 1,10$ bei 11 % Schlupf.

Hinsichtlich der Querschlupfcharakteristik sind die Unterschiede zwischen den vier Reifen nach Abbildung 4.9 weniger deutlich. ContiSportContact3 und Goodyear Excellence zeigen einen fast deckungsgleichen Verlauf mit einer Quersteifigkeit von $c_y = 23,8$ beziehungsweise $23,6$. Die Quersteifigkeiten des ContiEcoContact 3 und Pirelli Sottozero sind mit $c_y = 18,4$ beziehungsweise $20,8$ etwas geringer als bei den anderen beiden Reifen.

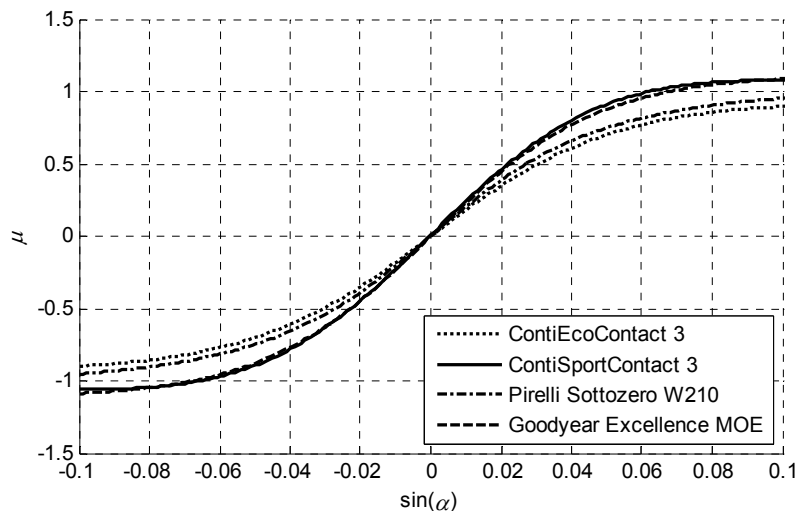


Abbildung 4.9: Reibwert-Querschlupf-Kurven der Versuchsreifen

In Abbildung 4.10 ist die statische Flächenpressungsverteilung der vier Reifen bei gleichem Reifeninnendruck ($p_i = 2,5$ bar) und unter gleicher Radlast ($F_z = 4,6$ kN) dargestellt. Die Daten wurden an einem Prüfstand der Daimler AG gemessen, bei dem das Rad über einen vertikal wirkenden Aktor an der Radnabe auf eine Folie mit Drucksensoren gedrückt wird. Dabei wurde die Radlast kontinuierlich von 0 auf 10 kN erhöht und dabei für den gesamten Radlastbereich die Aufstandsfläche und Flächenpressungsverteilung gemessen.

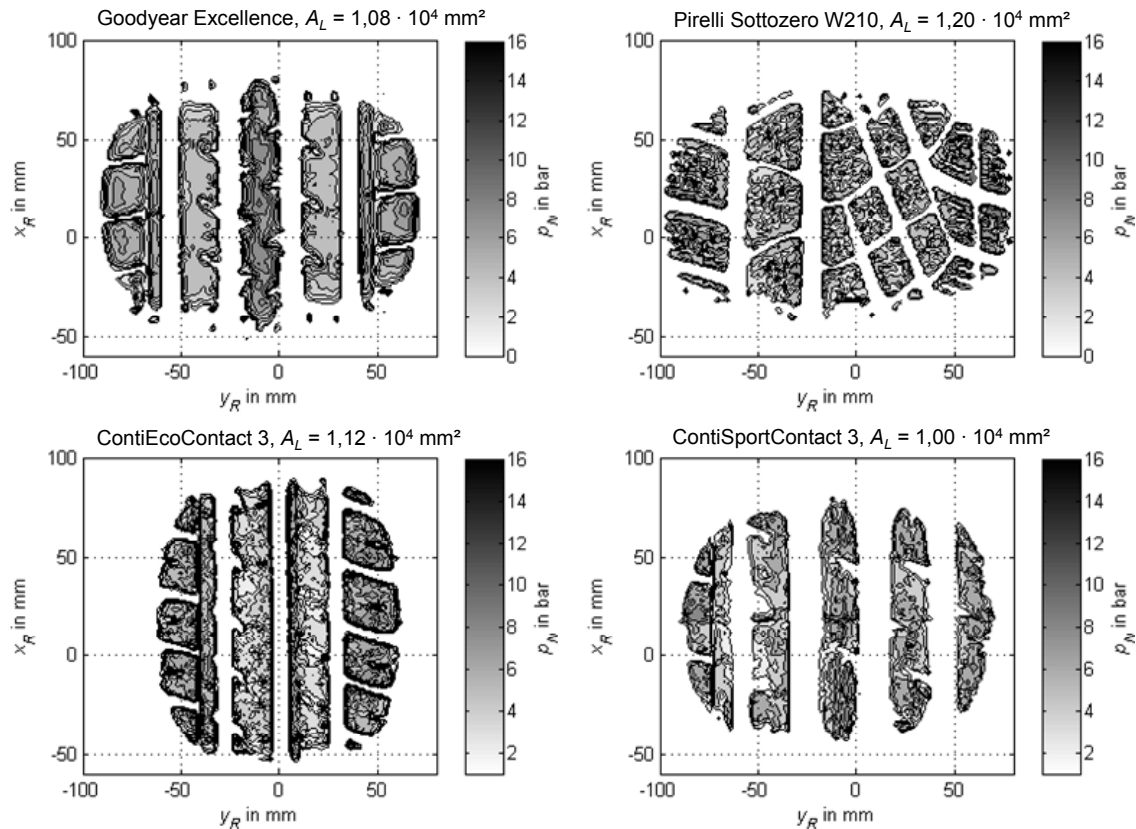


Abbildung 4.10: Profilabdruck, Flächenpressungsverteilung und Latschfläche A_L der vier Reifen ($p_i = 2,5$ bar, $F_z = 4,6$ kN)

Aus den gemessenen Latschflächen A_L ist zu erkennen, dass der Winterreifen trotz größerer Profilteilung den geringsten Profilnegativanteil und damit die größte Aufstandsfläche der vier Reifen besitzt, während der ContiSportContact 3 aufgrund der sehr breiten Umfangsrillen die geringste Aufstandsfläche der vier Reifen aufweist.

4.2.4 Fahrbahn

Die Versuche wurden auf dem universitätseigenen Testgelände, dem August-Euler-Flugplatz, bei Darmstadt durchgeführt. Abbildung 4.11 zeigt die verschiedenen Bereiche des Testgeländes. Die Start- und Landebahn, Taxiway und Vorbereitungszone besitzen eine alte (> 20 Jahre) Asphaltbeton-Fahrbahn (Typ AC 8), auf denen die Versuche mit PETRA und VERINA durchgeführt wurden. Für Sensitivitätsuntersuchungen mit VERINA standen zusätzlich die Zufahrtswege zu einem Hangargebäude mit relativ neuer Asphaltbetonfahrbahn (< 1 Jahr¹⁶⁰) und der Hallenboden des Hangars aus Beton zur Verfügung. Die Makrotextur (1-10 mm Wellenlänge) der drei Fahrbahntypen ist in den unteren drei Bildern der Abbildung 4.11 dargestellt.

¹⁶⁰ zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung

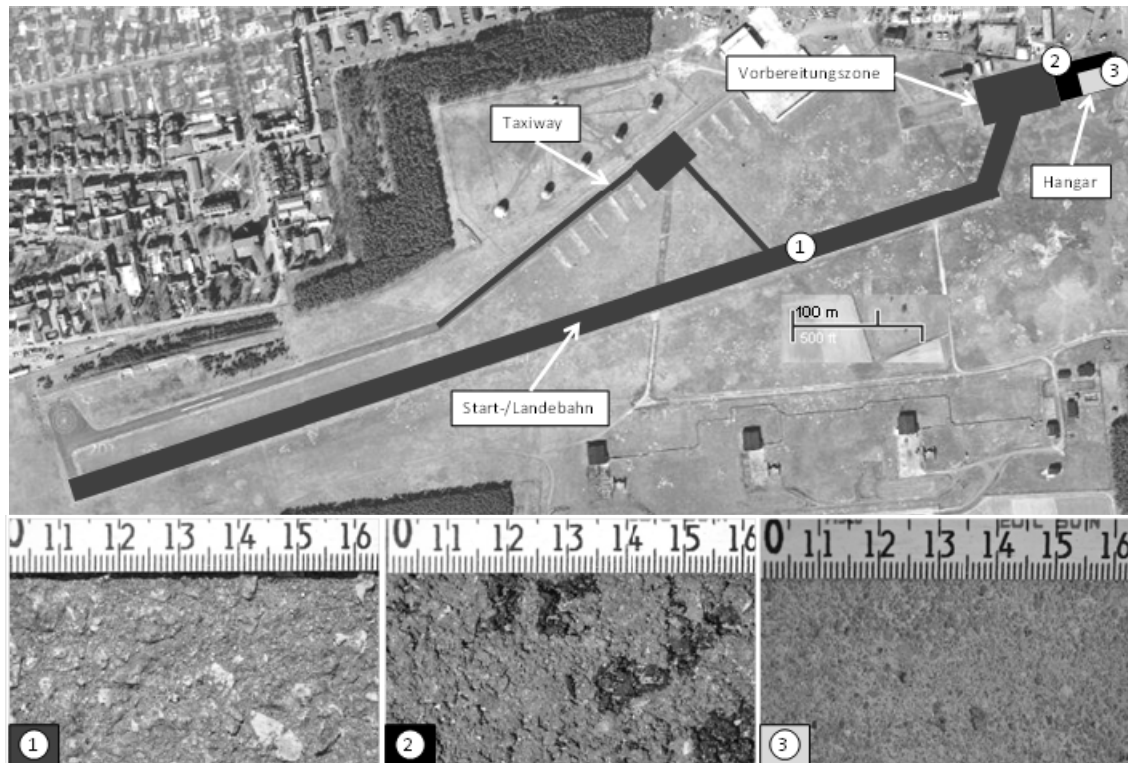


Abbildung 4.11: Versuchsgelände mit unterschiedlichen Fahrbahnbereichen (oben); alter Asphaltbeton (unten links), neuer Asphaltbeton (unten Mitte) und Beton (unten rechts)

4.2.5 Verschleißmessung

Zur Bestimmung der Verschleiß- sowie Schwärzungsrate mit VERINA wurde der Verschleiß der Profilausschnitte anhand des Masseverlusts gemessen. Die mittlere volumenbezogene Verschleißhöhe h_V über den Reibweg s_R und die effektive Reibbreite b_{eff} hängt über die Dichte ρ des Reifengummis nach Gleichung (4.1) mit dem Massenverlust Δm_V über dem Reibweg zusammen.

$$h_V = \frac{\Delta m_V}{\rho \cdot s_R \cdot b_{eff}} \quad (4.1)$$

Der Masseverlust wurde durch Wiegen der Profilausschnitte vor und nach dem Versuch mit einer Präzisionswaage (KERN PFB 200-3) gemessen. Diese besitzt einen Messbereich zwischen 1 mg und 200 g bei einer Auflösung sowie Reproduzierbarkeit von 1 mg¹⁶¹.

4.2.6 Sichtbarkeitsbewertung

Für die objektive Bewertung der tatsächlichen Sichtbarkeit wurden Fotos der erzeugten Spuren unter möglichst reproduzierbaren Licht- und Sichtbedingungen aufgenommen und der Kontrastwert zur Fahrbahn mittels bildverarbeitenden Methoden ermittelt. Das

¹⁶¹ lt. Herstellerangabe

Verfahren lässt sich damit in die Datenerhebung am Versuchsort und die nachträgliche Datenverarbeitung auf Basis der Fotos unterteilen, die von den gewählten Parametern bei der Aufnahme weitestgehend unabhängig ist.

Datenerhebung

Aus dem Stand der Forschung und Technik zur Sichtbarkeitsbewertung von Reifenspuren (vgl. Kapitel 2.1.3) ist bekannt, dass die Sichtbarkeit der tatsächlichen Intensität vor allem durch die Lichtverhältnisse, die Blickrichtung und den Blickwinkel beeinflusst wird. Da das Ziel des Verfahrens die Bewertung der tatsächlichen Intensität ist, müssen sichtbarkeitsbeeinflussende Faktoren konstant gehalten werden, damit entsprechend Gleichung (3.38) $\kappa = \text{const.}$ gilt. Dies wurde realisiert, indem der betrachtete Spurbereich mit einem rollbaren und lichtundurchlässigen Fotozelt (2,6 m x 1,25 m x 1,6 m) aus schwarzer Lkw-Plane abgedeckt und die Fotos unter diffusem Licht mit Hilfe eines externen Blitzgeräts (Nikon SB-28 DX) und eines Reflexschirms aufgenommen wurden. Dies ist in Abbildung 4.12 dargestellt.

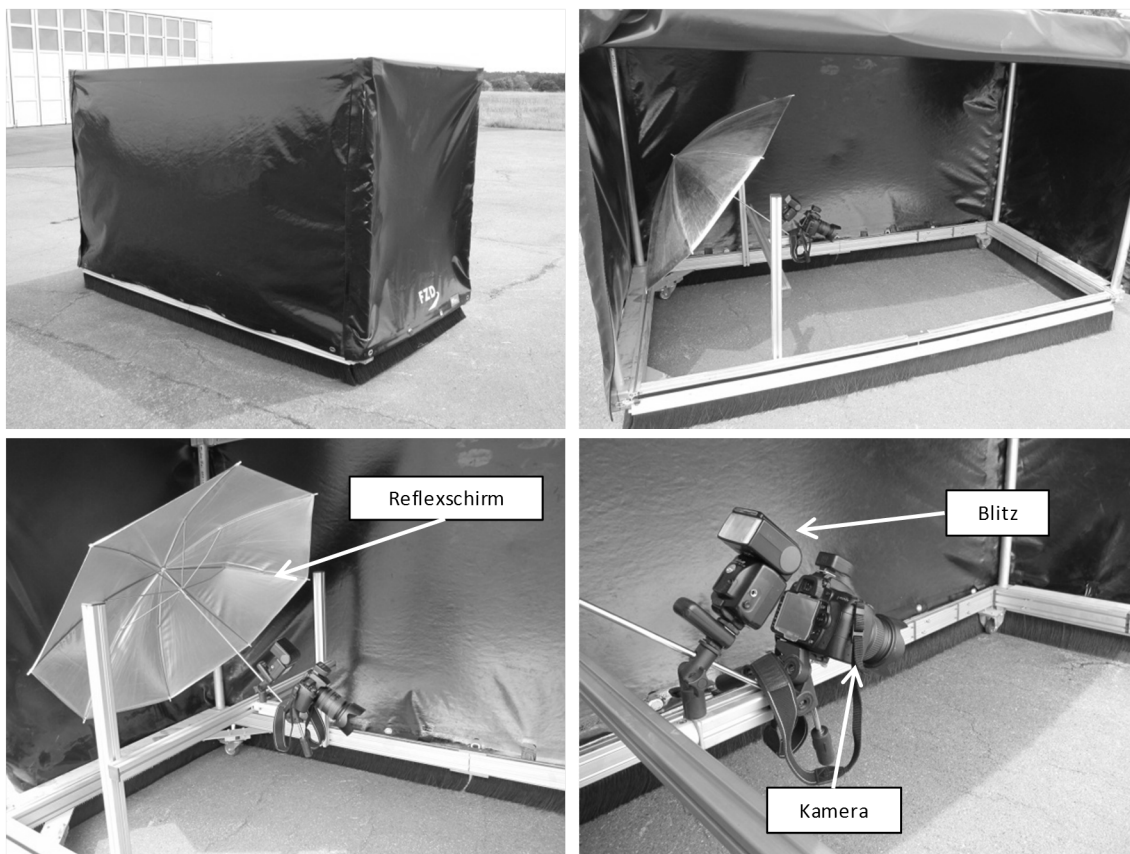


Abbildung 4.12: Fotozelt zur Aufnahme der Reifenspuren unter reproduzierbaren Bedingungen.

In dem Fotozelt ist in fester Höhe und unter festem Winkel zur Fahrbahn eine Spiegelreflexkamera (Nikon D90) installiert. Die Kamera- und Blitzeinstellungen sind ebenfalls konstant (Tabelle 4.6). Die Wahl der Kamerapositionierung und der Lichtbedingungen basieren zum einen auf den Empfehlungen aus der Literatur und zum anderen auf Ver-

suchen, in denen die Auswirkung unterschiedlicher Belichtungen und Kamerapositionen auf die Sichtbarkeit einer Spur untersucht wurden¹⁶².

Tabelle 4.6: Kamera- und Blitzeinstellungen

Kameramodell	Nikon D90
Pixelzahl des Bildsensors in Spurrichtung	max. 4288 (quer) x 2848 (längs)
Objektiv	AF-S DX VR Zoom- NIKKOR 18-200 mm 1:3,5-5,6G IF-ED
Brennweite	18 mm
Kamerahöhe	60 cm
Kamerawinkel zur Fahrbahn	30°
Blendenzahl	11
ISO-Wert	400
Belichtungszeit	1/80 s
Blitzgerät	Nikon SB-28DX
Blitzleistung	1/1
max. Leitzahl	42 (24 mm) bei ISO 200

Datenverarbeitung

Die Berechnung des Kontrastwertes der Spur wurde in mehreren Schritten mit der Software Matlab® durchgeführt, die in Abbildung 4.13 dargestellt sind. Da die Fotos aus einem Winkel von 30° aufgenommen werden, ist die Reifenspur darauf perspektivisch verzerrt dargestellt. Im ersten Schritt der Bildverarbeitung wird das Foto entzerrt. Dafür sind in dem Fotozelt an definierten Stellen rote Markierungen angebracht, die die Ecken eines Rechtecks darstellen. Aus der Position der Markierungen im Bild, die das Programm aufgrund der roten Farbe automatisch erkennt, und der Kenntnis der tatsächlichen Abstände zwischen diesen im Fotozelt wird eine Transformationsmatrix berechnet, mit der das Bild optisch so entzerrt wird, dass die im Ursprungsbild trapezförmig angeordneten Markierungen wieder in einem Rechteck des tatsächlichen Seitenverhältnisses erscheinen (siehe Abbildung 4.14). Im Anschluss an die Entzerrung wird das Bild so zurechtgeschnitten, dass nur die Fahrbahn mit der Spur abgebildet ist.

¹⁶² vgl. Kapitel 5.1

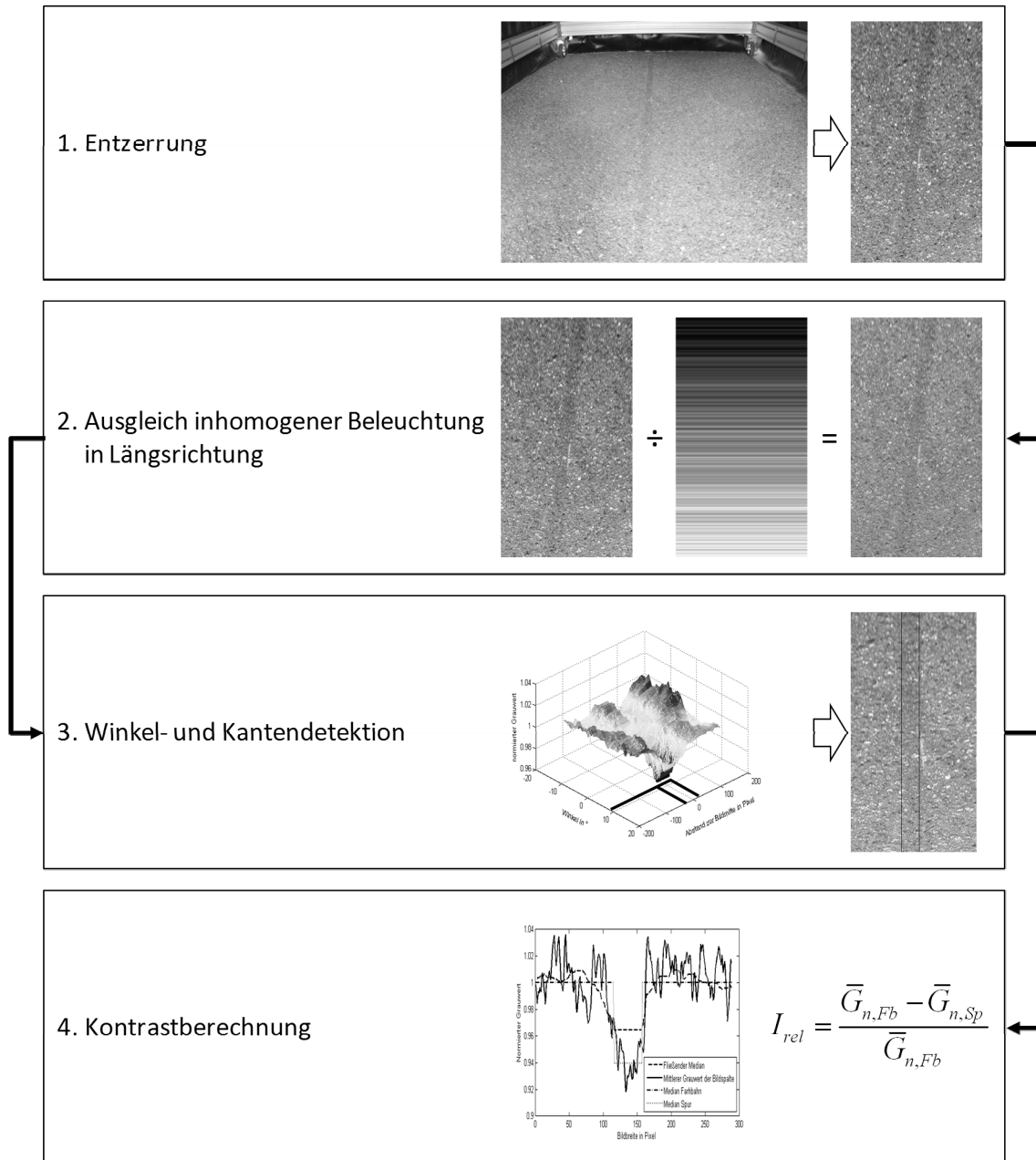


Abbildung 4.13: Ablauf der Bildverarbeitung

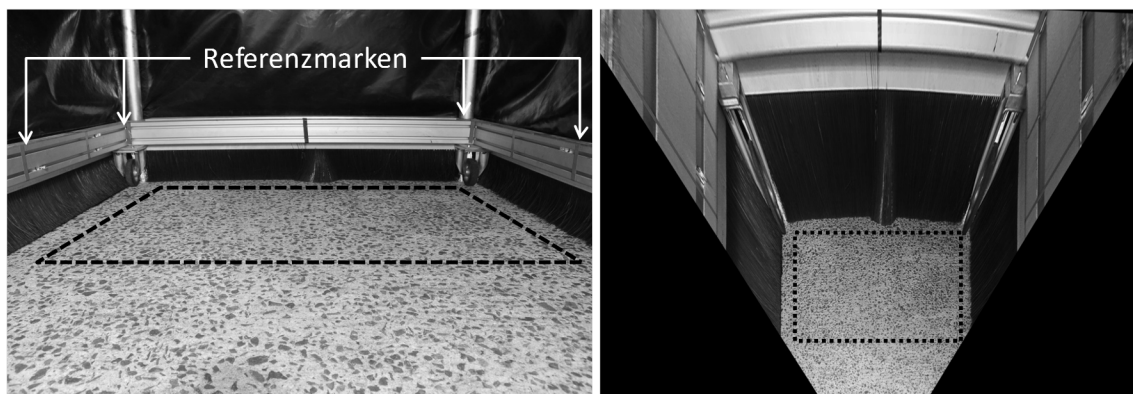


Abbildung 4.14: Originalbild (links) und Bild nach der Entzerrung (rechts) mit Bildausschnitt für die weitere Bearbeitung (schwarzer Rahmen).

Im zweiten Schritt wird die inhomogene Beleuchtung in Längsrichtung ausgeglichen. Da auch die Lichtquelle aus einem schrägen Winkel auf die Spur gerichtet ist, ist das Bild im vorderen Bereich heller als im hinteren. Dies wird dadurch ausgeglichen, dass jede Bildzeile durch den Mittelwert ihres Grauwerts geteilt wird.

Im dritten Schritt werden die genaue Position und der Winkel der Reifenspur im Bild ermittelt, da bei der Bildaufnahme die Kamera nur in gewissen Toleranzen genau in Fahrtrichtung ausgerichtet werden kann. Diesem Schritt liegt die Annahme zu Grunde, dass bei einem Azimut von 0° zwischen Reifenspur und optischer Achse der Kamera die Reifenspur genau parallel zum Bild liegt und sich somit über die Breite des Bildes im Bereich der Spur ein niedrigerer, über die Bildspalte gemittelter Grauwert im Vergleich zu den Bildbereichen ohne Spur ergibt. Je mehr der Winkel der Spur auf dem Foto allerdings davon abweicht umso breiter und weniger ausgeprägt ist der Bereich. In Anlehnung an die Hough-Transformation¹⁶³, einem Verfahren zur Erkennung der Lage und Richtung von Kanten in Binärbildern, wird das Foto innerhalb eines Winkelbereichs ($\pm 10^\circ$ in $0,5^\circ$ -Schritten) gedreht und jeweils der fließende Median der mittleren Grauwerte aller Bildspalten über die Bildbreite berechnet. Aus dieser Matrix, deren Spaltenanzahl der Bildbreite in Pixeln, und deren Zeilen den Drehwinkeln des Bildes entsprechen, werden die Position und der Winkel der Spur aus der Lage des Minimums ermittelt. Dies ist beispielhaft in Abbildung 4.15 dargestellt. Die Abbildung zeigt links ein Foto einer mit VERINA erzeugten Spur, die nicht parallel zur Bildhöhe verläuft. Aus dem Minimum der Matrix bei einem normierten Grauwert von 0,965 ergeben sich ein Drehwinkel von $8,5^\circ$, eine Breite von 41 Pixeln und die Abstände der linken Kante von 28 Pixeln sowie der rechten Kante von 13 Pixeln zur Bildmitte.

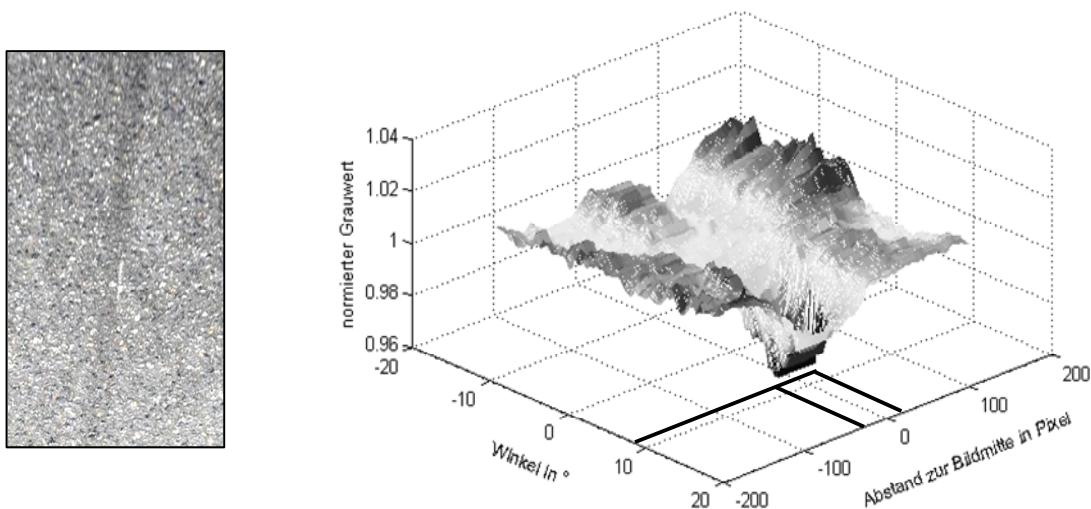


Abbildung 4.15: Normierter, spaltenweise gemittelter Grauwert des Fotos über den Abstand zur Bildmitte und den Drehwinkel.

¹⁶³ Hough: Method and means for recognizing complex patterns, 1962

Die Anwendung eines fließenden Medians über die Bildbreite erhöht die Trennschärfe an den äußeren Rändern der Spur, da der Median einen Sprung macht, sobald mehr als die Hälfte der Werte innerhalb der gewählten Fensterweite deutlich niedrigere Werte aufweisen. Die Fensterweite muss daher so gewählt werden, dass sie nicht größer als das Doppelte des minimal zu erwartenden Spurbereichs, also der Breite einer Profilrippe (mindestens 19 mm bei den Versuchsreifen), ist. Da die Fotos immer mit konstanter Entfernung und Brennweite aufgenommen werden, wird das Abbildungsverhältnis (2,6 Pixel/mm) als konstant angenommen. Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 4.16 der mittlere normierte Grauwert über die Bildbreite des um 8,5° gedrehten Fotos aus Abbildung 4.15 dargestellt sowie der fließende Median der Mittelwerte über die Bildbreite. Im Bereich der Spur bildet sich ein Minimum als Plateau aus.

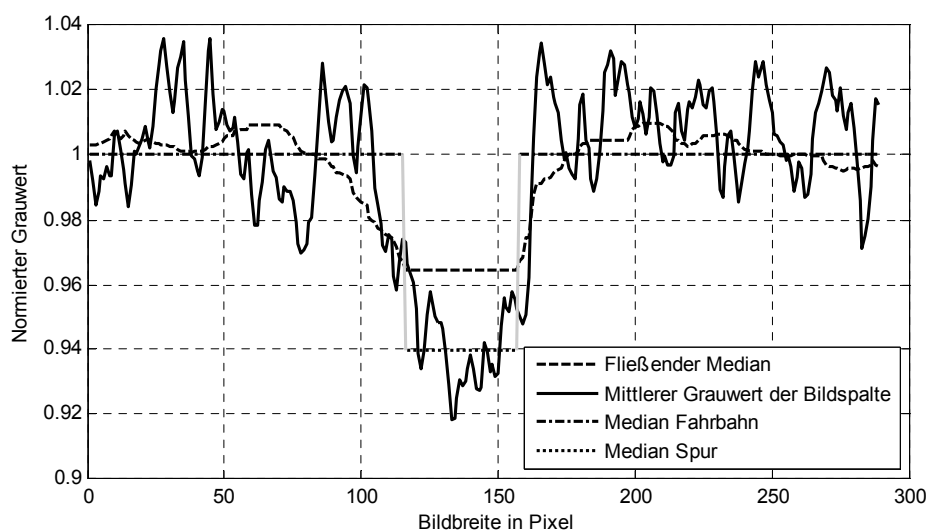


Abbildung 4.16: Mittlerer normierter Grauwert der Bildspalten und fließender Median über die Bildbreite, Median aller Grauwerte der Fahrbahn und Median aller Grauwerte der Spur.

Als Kanten der Reifenspur wird die erste und letzte Bildspalte mit minimalem Grauwert des fließenden Medians definiert. Der Kontrastwert der Spur berechnet sich dann aus dem Median der mittleren Grauwerte aller Bildspalten außerhalb der Spur $\bar{G}_{n,Fb}$ und dem Median der mittleren Grauwerte aller Bildspalten innerhalb der Spur $\bar{G}_{n,S}$ (vgl. Abbildung 4.16) nach Gleichung (4.2).

$$K = \frac{\bar{G}_{n,Fb} - \bar{G}_{n,S}}{\bar{G}_{n,Fb}} \quad (4.2)$$

4.3 Versuchsmethodik

Ziel der Versuche war die Untersuchung der ausgewählten Einflussgrößen bei exemplarischer Variation in Stichversuchen bei möglichst konstanten Umgebungsbedingungen sowie Minimierung nicht kontrollierbarer Einflussfaktoren.

4.3.1 Versuchsvorbereitung

Für die Versuche mit dem Reifenmessanhänger PETRA standen jeweils mehrere Reifen des jeweiligen Reifentyps zur Verfügung. Die Reifen wurden aus dem Versuch genommen, sobald eine Restprofiltiefe von 4 mm erreicht war. Zu Beginn eines jeden Versuchstages wurde der Reifen durch eine Längsschlupftrampe von 0 - 50 % und eine Schräglaufwinkelrampe von -8 - +8° eingefahren. Zur Ermittlung der profiltiefenabhängigen Längs- und Quersteifigkeit des Reifens für die spätere Berechnung der Reibkraft wurde mindestens einmal pro Versuchstag eine Reibwert-Längsschlupf- sowie Reibwert-Schräglaufwinkel-Messung durchgeführt. Da in die Messung der Längs- und Seitenkräfte am Reifen über die Kraftmessfelge auch der Steigungswiderstand der Fahrbahn eingeht (mit dem Faktor $\cos \alpha$ bei der Längs- beziehungsweise $\sin \alpha$ bei der Querkraft), wurde die Messung zweimal hintereinander in entgegengesetzte Richtungen der Fahrbahn durchgeführt. Zwischen den Messungen wurde solange gewartet, bis sich die gleiche Ausgangstemperatur der Reifenoberfläche eingestellt hat. Alle Reifen wurden bei einem Reifeninnendruck von 2,5 bar getestet.

Die Versuche mit dem Reibprüfstand VERINA erfolgten auf möglichst ebenen Fahrbahnflächen, um die Normalkraftschwankungen gering zu halten. Die Fahrbahn wurde vor dem Versuch von losen Steinchen und Sand gereinigt. Die Reibfläche neuer Profilausschnitte wurde vor dem eigentlichen Versuch mit VERINA eingefahren.

4.3.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche mit PETRA wurden bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 30 km/h durchgeführt, bei konstanten Sollwerten für Längsschlupf- und Schräglaufwinkel. Der Versuchsaufbau bestand aus einer Pylonengasse, welche die Solltrajektorie des Zugfahrzeugs mit dem Messanhänger PETRA vorgibt sowie fünf Lichtschrankenreflektoren. Dieser Aufbau ist in Abbildung 4.17 dargestellt.

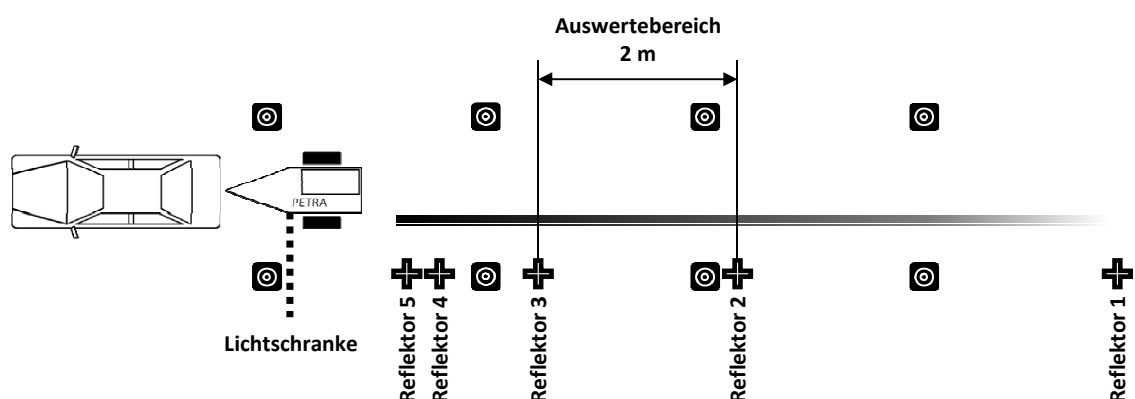


Abbildung 4.17: Versuchsaufbau bei Versuchen mit PETRA

Durch den ersten Lichtschrankenimpuls wurde die Messung sowie die Regelung des Längsschlupfs und des Schräglaufwinkels auf die eingestellten Sollwerte gestartet. Der

zweite und dritte Reflektor markieren einen Bereich von ca. 2 bis 2,5 m, innerhalb dessen die Intensität der erzeugten Reifenspür, falls vorhanden, bestimmt und die Messwerte von PETRA gemittelt wurden. Die zwei kurz hintereinander eintreffenden Lichtschrankenimpulse durch die beiden letzten Reflektoren beenden die Messung und die Sollwertregelung. Die Versuche wurden von mindestens zwei Personen durchgeführt. Eine Person fuhr das Zugfahrzeug und bediente den Mess- und Steuer-PC im Fahrzeug, die andere Person blieb etwa 10 m vor dem Auswertebereich der Spur an der Seite stehen, um nach Vorbeifahrt von PETRA die Spurzeichnung des Messrades identifizieren und markieren zu können. Es wurden aus der Entfernung und Winkel, aus dem die Spur subjektiv am besten zu erkennen war, Fotos unter Tageslicht zu Dokumentationszwecken aufgenommen und anschließend für die Intensitätsbewertung im Fotozelt. Jeder Versuch wurde mit konstanten Einstellungen insgesamt dreimal gefahren. Die Wiederholung der Versuche sowie die Variation des Längsschlupfes und des Schräglaufwinkels erfolgten nicht direkt hintereinander beziehungsweise nicht in einer bestimmten auf- oder absteigenden Folge, um Reihenfolgeeffekte auszuschließen.

Für die Bestimmung der Spurzeichnungssensitivität der Reifen-Fahrbahn-Kombination der PETRA-Versuche wurden mit VERINA in etwa 40-cm-Abständen parallel zu jeder PETRA-Spur innerhalb des Auswertebereichs jeweils drei Referenzspuren unterschiedlicher Reibkraft (durch Vorgabe einer Normalkraft) erzeugt. Dies ist beispielhaft in Abbildung 4.18 dargestellt. Die Reibkraft pro Reibbreite entspricht dabei den Werten, die bei 30 km/h bei dem jeweiligen Reifen bei einem Gleitschlupf von 18 % ($v_R = 1,5$ m/s), 24 % ($v_R = 2,0$ m/s) und 36 % ($v_R = 3,0$ m/s) vorliegen (vgl. Kapitel 4.3.3).

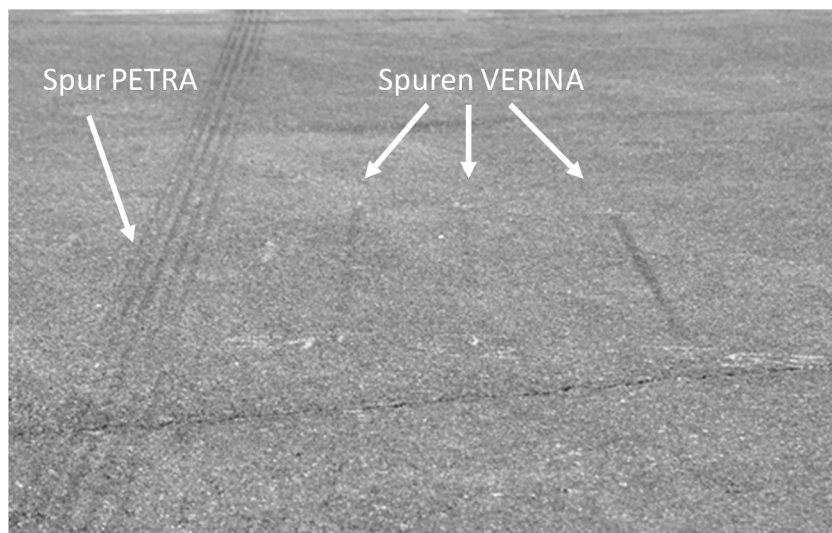


Abbildung 4.18: PETRA-Spur mit Referenzspuren von VERINA

Bei den Untersuchungen zur Verschleiß- und Schwärzungsrate mit VERINA, zu denen keine PETRA-Versuche korrespondieren, wurden Normalkraft, Reibgeschwindigkeit, Größe der Profilelemente und Fahrbahn variiert. Jeder Versuch einer Versuchsreihe wurde dreimal wiederholt. Auch dabei wurden die Parametervariationen und die Versuchswiederholungen zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten permutiert.

Für die Untersuchung des Einflusses variierender Licht- und Sichtbedingungen wurde eine Referenzspur mit VERINA erzeugt und Fotos derselben Spur unter Variation der folgenden Parameter aufgenommen:

- Kamerawinkel (Azimut und Elevation)
- Belichtungswinkel (Elevation)
- Belichtungsart (direktes Licht, diffuses Licht, Blitzleistung)
- Kameraposition in Längs- und Querrichtung

Die Freiheitsgerade hinsichtlich Kamera- und Lichtposition beziehungsweise -Winkel sind in Abbildung 4.19 dargestellt.

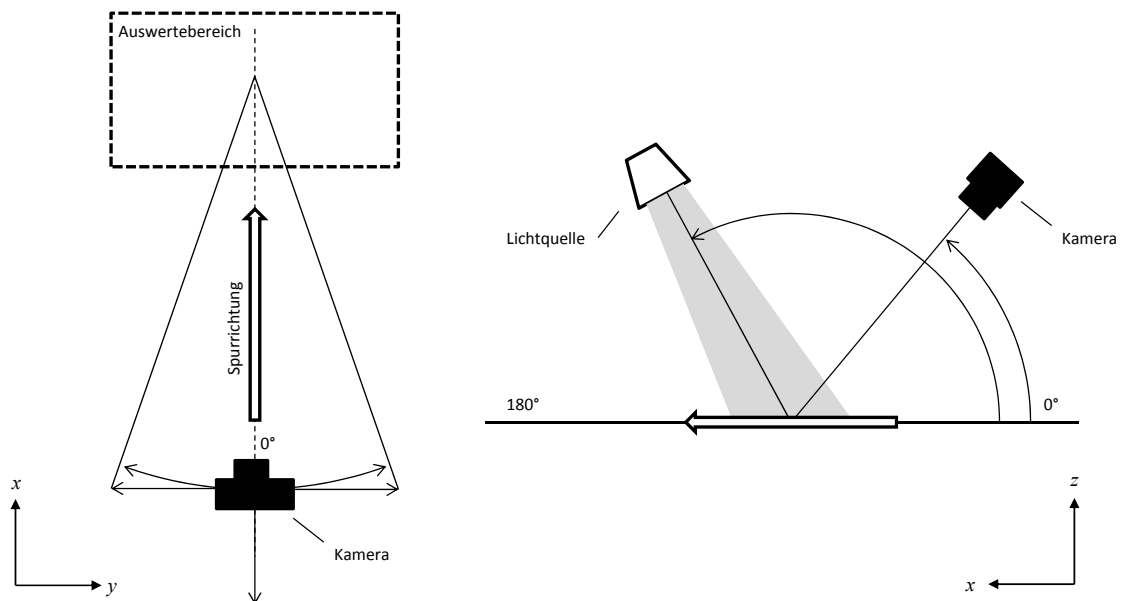


Abbildung 4.19: Variation der Kamera- und Lichtposition.

4.3.3 Ermittlung der Kenngrößen aus den Messwerten

Während bei VERINA die Reibkraft, Reibbreite sowie die Gleitgeschwindigkeit direkt gemessen wurden, erfolgte bei PETRA eine Berechnung der Größen auf Basis der zur Verfügung stehenden Messgrößen.

Reibkraft

Die Reibkraft für einen schlüpfenden Reifen berechnet sich nach Gleichung (4.3) aus dem Produkt der resultierenden Führungskraft und dem resultierenden Gleitschlupf¹⁶⁴.

$$F_{R,res} = F_z \sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2} \cdot \left(\sqrt{\lambda_x^2 + \frac{c_y}{c_x} \cdot \sin^2 \alpha} - \frac{\sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}}{c_x} \right) \quad (4.3)$$

¹⁶⁴ vgl. Kapitel 3.2

Die Größen, die für die Berechnung bei PETRA direkt gemessen werden, sind

- die Längskraft F_x , die Querkraft F_y und die Radlast F_z des Reifens,
- der Schräglaufwinkel α ,
- die Winkelgeschwindigkeit des Rades ω ,
- der dynamische Reifenhalbmesser r_{dyn} ,
- und die Fahrzeuggeschwindigkeit v .

Daraus wurden die folgenden Größen berechnet:

- Reibungskoeffizient μ_x in Längs- und μ_y in Querrichtung

$$\mu_x = \frac{F_x}{F_z} \quad (4.4)$$

$$\mu_y = \frac{F_y}{F_z} \quad (4.5)$$

- Bremsschlupf λ

$$\lambda = \frac{v \cdot (\cos \alpha) - \omega \cdot r_{dyn}}{v} \quad (4.6)$$

- sowie Längs- c_x und Quersteifigkeit c_y

$$c_x = \left. \frac{\partial \mu_x}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=0} = B_{1,x} \cdot B_{2,x} \cdot B_{3,x} \quad (4.7)$$

$$c_y = \left. \frac{\partial \mu_y}{\partial (\sin \alpha)} \right|_{\alpha=0} = B_{1,y} \cdot B_{2,y} \cdot B_{3,y} \quad (4.8)$$

Bis auf die Längs- und Quersteifigkeit des Reifens wurden die Größen aus den Messwerten des jeweiligen Versuchs berechnet. Die Steifigkeiten hingegen wurden aus dem Fitting der „Magic-Formel“¹⁶⁵ in die Messwerte der Reibwert-Schlupf-Messungen zu Beginn des Versuchstages bestimmt. B_1 , B_2 , B_3 und B_4 sind die Fitting- beziehungsweise Pacejka-Parameter. Die Gleichung (4.9) stellt beispielhaft die Pacejka-Formel für den Reibwert über den Längsschlupf dar. Unter Schräglauf gilt diese analog mit der Substitution $x = y$ und $\lambda = \sin \alpha$.

$$\mu_x(\lambda) = B_{1,x} \cdot \sin \left[B_{2,x} \cdot \arctan \left\{ B_{3,x} \cdot \lambda - B_{4,x} \cdot (B_{3,x} \cdot \lambda) - \arctan(B_{3,x} \cdot \lambda) \right\} \right] \quad (4.9)$$

Das Ergebnis des Fittings im Vergleich zu den Rohdaten einer beispielhaft gewählten PETRA-Messung des ContiSportContact 3 ist unter reinem Längsschlupf in Abbildung 4.20 und unter reinem Querschlupf in Abbildung 4.21 dargestellt. Die Ausgleichsfunkti-

¹⁶⁵ Pacejka: Tire and vehicle dynamics, 2002, S. 6

on ist als durchgehende Linie dargestellt und der lineare Bereich, dessen Anstieg der Längs- beziehungsweise der Quersteifigkeit entspricht, als gestrichelte Linie.

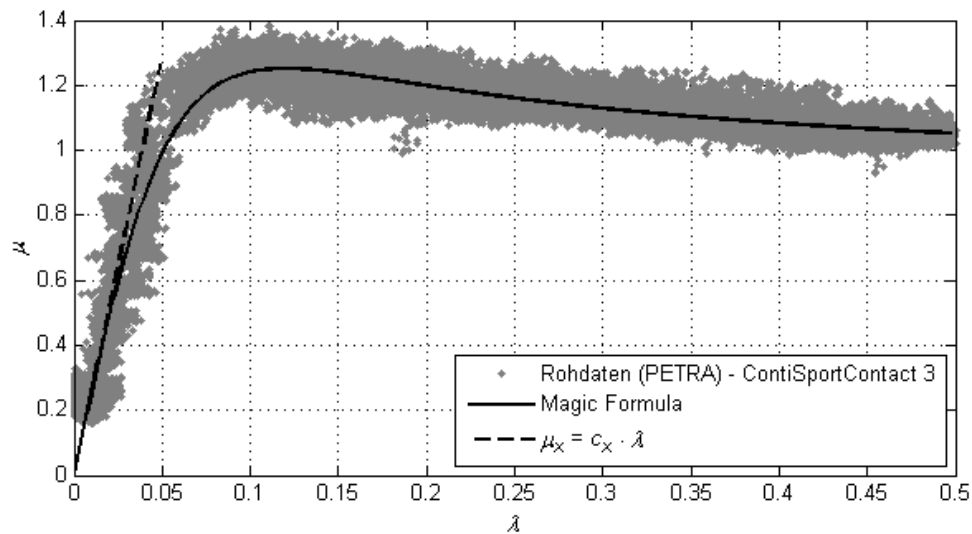


Abbildung 4.20: Rohdaten der μ -Schlupf-Messungen unter reinem Längsschlupf, Ausgleichsfunktion und lineare Steigungsgerade.

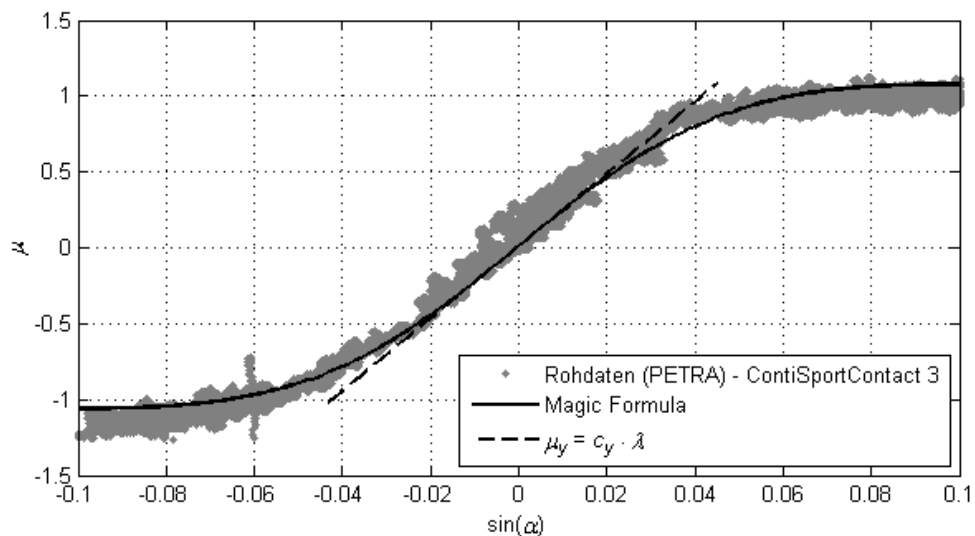


Abbildung 4.21: Rohdaten der μ -Schlupf-Messungen unter reinem Querschlupf, Ausgleichsfunktion und lineare Steigungsgerade

Der zu erkennende Offset der Reibwerte (ca. 0,15) unter Schräglauf geht darauf zurück, dass der Sturzwinkel des Messrades bei PETRA nicht exakt 0° beträgt, sondern nur innerhalb eines Unsicherheitsbereichs von ca. $\pm 0,5^\circ$ eingestellt werden kann. Bei wechselnder statischer Einfederung, beispielsweise aufgrund einer Radlastvariation oder Veränderung der Spurweite durch eine andere Reifendimension, ist eine Nachstellung des Sturzes erforderlich. Dies erfolgt mit Hilfe einer Wasserwaage. Abweichungen von dem Sollwert ergeben sich dabei durch Unebenheit des Messplatzes sowie der Ablesegenauigkeit der Wasserwaage.

Reibbreite

Da die Latschform und Flächenpressungsverteilung nicht während der Versuche gemessen werden konnten, wurden diese aus den statischen Messungen in Abhängigkeit der Radlast bestimmt. Für jeden Zeitschritt bei gleichzeitiger kontinuierlicher Erhöhung der Radlast ist die gesamte Flächenpressungsverteilung auf der Druckfolie in eine Matrix abgelegt, deren Zeilen und Spaltenanzahl den Abmessungen der Folie und deren Werte der Flächenpressung an dem jeweiligen Messpunkt entsprechen. Die Breite des Postivanteils des Latsches über die Latschlänge wurde ermittelt, indem zeilenweise die Summe aller Zellen, deren Flächenpressung $p_N > 0$ ist, mit dem Zellenabstand (1,52 mm) multipliziert wird. Das Maximum der Breite über der Latschlänge ergibt dann die effektive Breite unter reinem Längsschlupf für eine konstante Radlast. Analog wurde die effektive Höhe über die Latschbreite gebildet, um nach Gleichung (3.16) die effektive Reibbreite bei kombinierten Schlupf zu berechnen. Die auf diese Weise ermittelten Werte für die effektive Latschbreite und -höhe ist für alle vier Reifenmodelle bei einem Reifeninnendruck von $p_i = 2,5$ bar in Abbildung 4.22 dargestellt. Für die Berechnung der breitenbezogenen Reibkraft bei den Versuchsfahrten wurde die effektive Reibbreite aus den dargestellten Kurven ausgewählt, die der gemittelten Radlast über dem Auswertebereich entspricht.

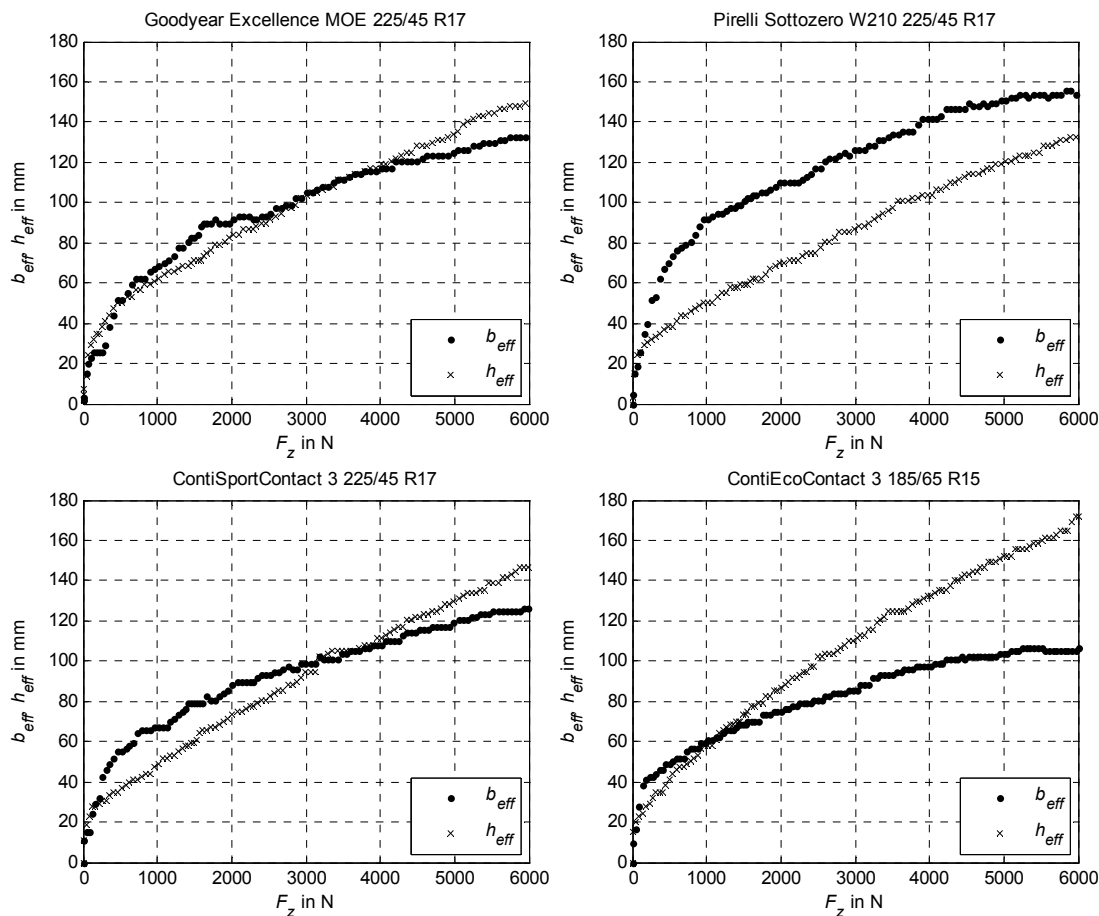


Abbildung 4.22: Latschbreite b_{eff} und -höhe h_{eff} ohne Profilnegativanteil als Funktion der Radlast F_z .

Gleitgeschwindigkeit

Die mittlere Gleit- beziehungsweise Reibgeschwindigkeit v_R der Profilblöcke im Reifenlatsch von PETRA, die für die Vergleichsmessungen mit VERINA als Sollwerte diente, wurde aus dem Produkt des mittleren Gleitschlupfs, der aus dem resultierenden Gesamtschlupf mit den Reifensteifigkeiten nach Gleichung (3.9) berechnet wird, und der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit v über dem Auswertebereich nach Gleichung (4.10) bestimmt.

$$v_R = \lambda_{g,res} \cdot v = \left(\sqrt{\lambda_x^2 + \frac{c_y}{c_x} \cdot \sin^2 \alpha} - \frac{\sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}}{c_x} \right) \cdot v \quad (4.10)$$

Abbildung 4.23 zeigt beispielhaft die gemessenen Reibwerte bei VERINA während der Beschleunigung des Schlittens auf 1500, 2000 und 3000 mm/s bei jeweils drei verschiedenen Normalkräften im Vergleich zur auf die Gleitgeschwindigkeit umgerechnete Reibwert-Längsschlupfkennlinie für einen der Versuchsreifen (ContiSportContact 3). Es ist zu erkennen, dass ab einer Gleitgeschwindigkeit von 200 mm/s die Reibwerte innerhalb eines maximalen Streubereichs von 20 % liegen.

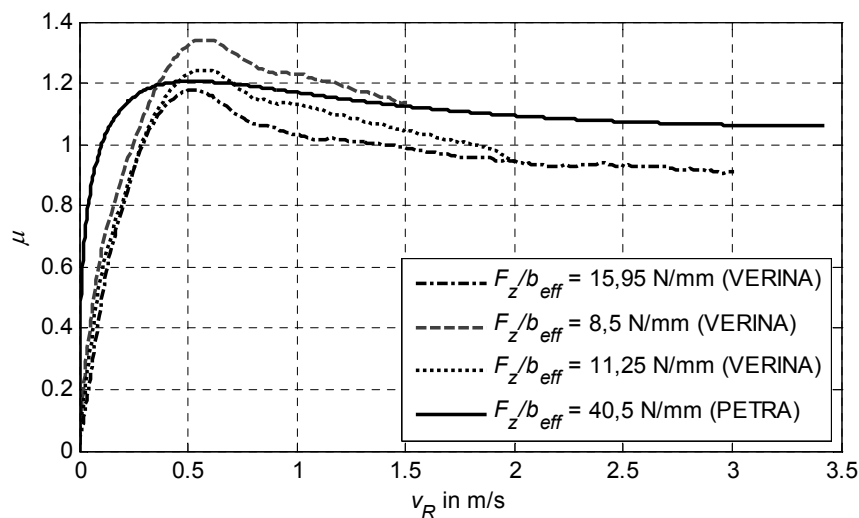


Abbildung 4.23: Reibwert über Gleitgeschwindigkeit für einen ContiSportContact 3 im Vergleich zwischen PETRA und VERINA bei Variation der Normalkraft

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen vorgestellt. Dabei wird entsprechend der Versuchsmethodik eine Gliederung der Ergebnisse nach Einflussfaktoren auf die Sichtbarkeit, Einflüsse durch Reifen- und Fahrbahneigenschaften und fahrdynamische Einflussgrößen vorgenommen.

5.1 Sichtbarkeit

Die folgenden Ergebnisse zeigen den Einfluss ausgewählter Variationsgrößen bei der Bildaufnahme und Bildverarbeitung auf die Höhe des berechneten Kontrasts der Spur bei konstanter tatsächlicher Intensität. Eine Übersicht der durchgeführten Stichversuche ist in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1: Übersicht der durchgeführten Versuche zur Sichtbarkeit

Versuchsreihe	Variationsgröße	Darstellungen
1.1	Kamera- und Lichtwinkel (Elevation)	Abbildung 5.1
1.2	Belichtungsart- (diffus, direkt), Blitzleistung und Lichttemperatur (warm, kalt)	Abbildung 5.2, Abbildung 5.3
1.3	Kamerawinkel (Azimut) und Position (lateral)	Abbildung 5.4, Abbildung 5.5, Abbildung 5.6
1.4	Bildanzahl	Abbildung 5.7, Abbildung 5.8
1.5	Höhe und Breite des Bildausschnitts	Abbildung 5.10, Abbildung 5.11, Abbildung 5.12, Abbildung 5.13

5.1.1 Einfluss der Bildaufnahme

Aufnahme- und Lichtverhältnisse im Fotozelt

Die Versuchsreihen 1.1 und 1.2 haben den Einfluss der Variation der Belichtung (Winkel und Lichtart) sowie der Aufnahmeposition in den räumlichen Grenzen des Fotozelts auf den Kontrast der Spur untersucht. Der Abstand zwischen Kamera und Bildmittelpunkt betrug konstant 1,2 m.

Abbildung 5.1 zeigt den Sichtbarkeitsfaktor κ , bezogen auf den maximal berechneten Kontrastwert, bei Variation des Kamerawinkels und des Lichtwinkels zur Fahrbahnebene. Lichtquelle war ein Blitz, der direkt auf die Fahrbahn gerichtet ist. Es ist zu erkennen, dass der höchste Kontrast bei einem Kamera- und Lichtwinkel von 30° und der geringste bei einem Kamerawinkel von 30° und einem Lichtwinkel von 150° erreicht werden. Bei Kamerawinkel von 30° und 150° ist der Kontrast jeweils bei Belichtung

aus gleicher Richtung am höchsten. Bei einer Belichtung senkrecht zur Fahrbahn (90°) ist der Kontrast jedoch bei Belichtung aus gleicher Richtung am niedrigsten. Die Standardabweichung der absoluten Kontrastwerte bei Variation des Kamera- und Lichtwinkels beträgt $1,2 \cdot 10^{-2}$.

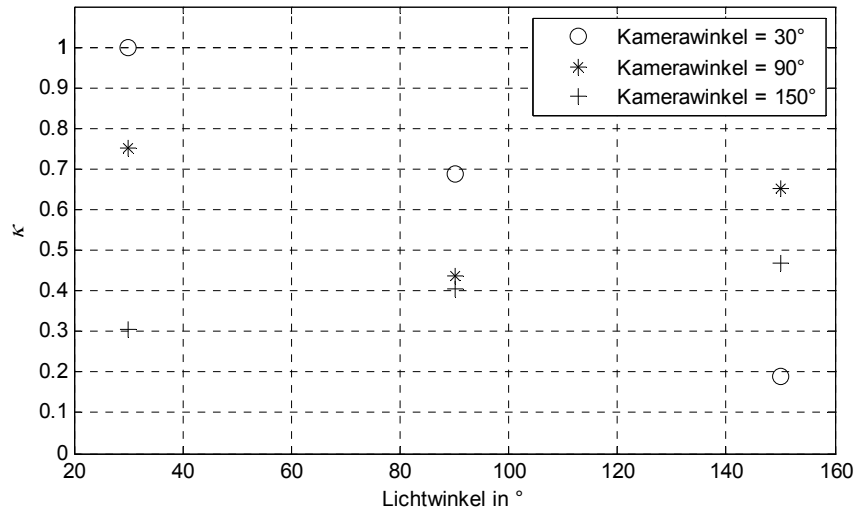


Abbildung 5.1: Normierter Kontrast der Spur bei Variation von Kamera und Lichtwinkel

In Abbildung 5.2 ist der Sichtbarkeitsfaktor für vier verschiedene Belichtungsarten aufgetragen. Dabei wurde mit direktem Blitzlicht bei einer Variation der Blitzleistung (viertel und halbe Blitzleistung) und diffus mit einem Reflexschirm bei voller Blitzleistung und Variation der Farbtemperatur (goldene und silberne Reflektionsfläche des Schirmes) belichtet. Kamera- und Lichtwinkel betrugen konstant 30° . Mit jeder Variante wurden zehn Bilder aufgenommen. Dargestellt sind für jede der vier Varianten jeweils der Mittelwert der berechneten Kontrastwerte aller zehn Bilder sowie der Streubereich zwischen minimalem und maximalem Kontrastwert.

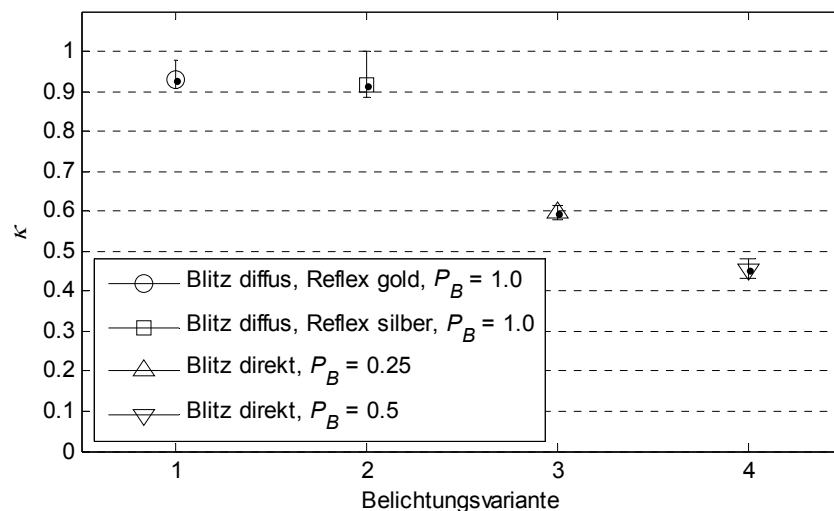


Abbildung 5.2: Normierter Kontrast der Spur bei Variation der Belichtungsart

Es ist zu erkennen, dass der Kontrastwert der Spur bei diffuser Belichtung deutlich höher ist als bei direktem Blitzlicht, wobei in letzterem Fall der Kontrastwert mit zunehmender Blitzleistung weiter abnimmt. Die Kontrastwerte bei Variation der Lichttemperatur sind ähnlich, der Mittelwert bei goldener Reflektionsfläche („warmes“ Licht) liegt etwas über dem Mittelwert bei silberner Fläche („kaltes Licht“). Die Standardabweichung der Absolutwerte bei Variation der Belichtung beträgt $2 \cdot 10^{-2}$.

Abbildung 5.3 zeigt die kumulierte Häufigkeit der mittleren Grauwerte über die Breite für jeweils ein repräsentatives Bild je Belichtungsvariante. Es ist zu erkennen, dass die Helligkeit bei direktem Blitz und mit zunehmender Blitzleistung deutlich höher als bei diffusem Licht ist. Bei den Belichtungsvarianten mit unterschiedlicher Farbtemperatur fällt auf, dass zwar der Median der Grauwerte annähernd gleich groß, der Kontrastumfang im unteren Grauwertbereich bei dem wärmeren Licht allerdings größer ist.

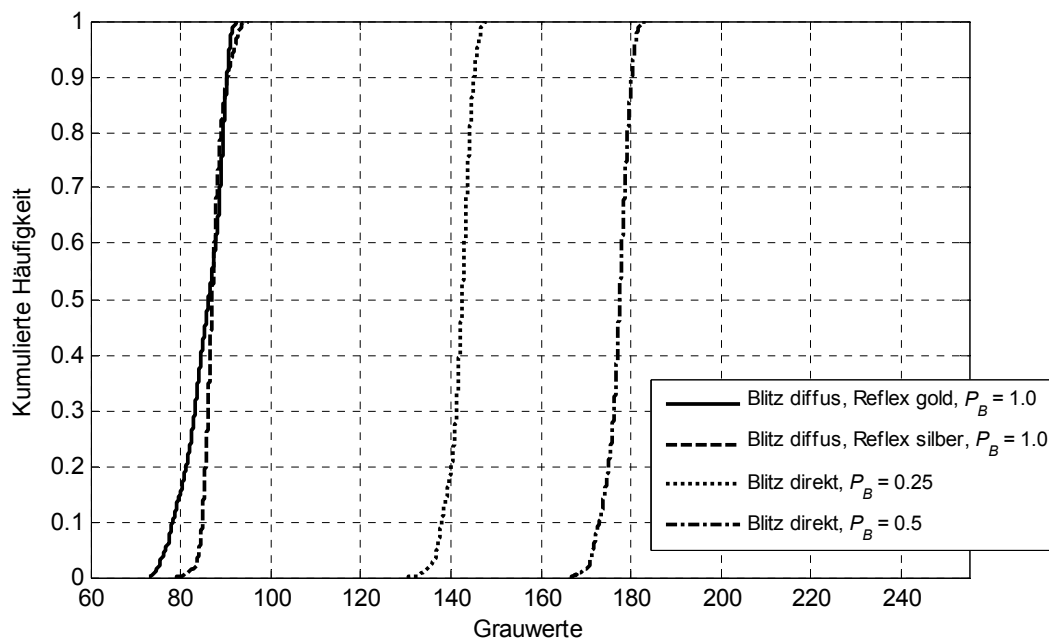


Abbildung 5.3: Kumulierte Häufigkeit der Grauwerte bei verschiedenen Belichtungsarten

Ausrichtung des Fotozelts zur Spur

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse zeigen den Einfluss von Unsicherheiten bei der Positionierung des Fotozelts zur Spur. Der Variationsbereich wurde entsprechend der abgeschätzten Positionierungsgenauigkeit des Zelts durch die Versuchsbetreuer im Versuch gewählt. Kamera- und Blitzeinstellungen sowie die Größe des Bildausschnitts waren konstant. Auf jeder Position wurden zwei Fotos aufgenommen.

Abbildung 5.4 zeigt die Abweichung des berechneten Kontrastwertes vom Mittelwert bei Aufnahmen derselben Stelle unter Variation der lateralen Position des Zeltes zur Spur. Es ist zu erkennen, dass die relativen Abweichungen der berechneten Kontrastwerte vom Mittelwert bis zu 9,0 % betragen. Absolut ergibt sich eine Standardabweichung von $3,5 \cdot 10^{-3}$.

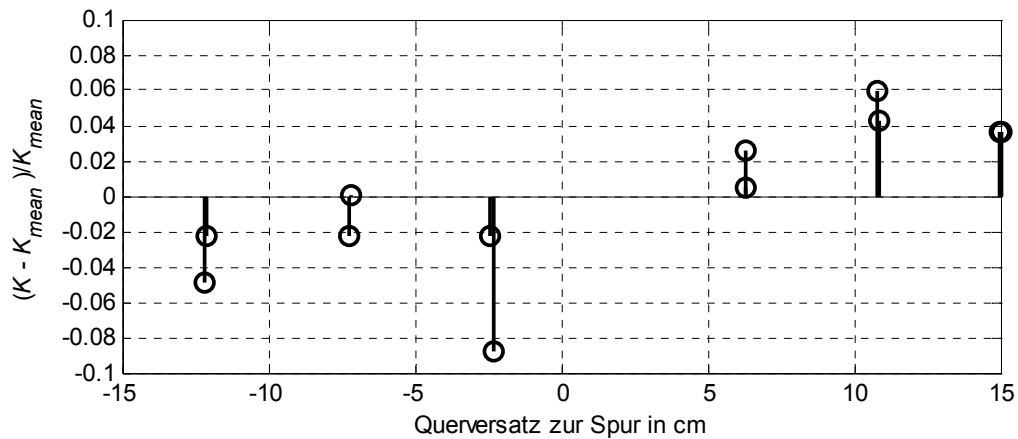


Abbildung 5.4: Abweichung des berechneten Kontrastwertes vom Mittelwert über dem Parallelversatz.

In Abbildung 5.5 ist die relative Abweichung des berechneten Kontrastwertes vom Mittelwert bei Drehung des Fotozells um die Hochachse um Winkel bis 6° dargestellt. Diese beträgt bis zu 10 %. Absolut ergibt sich dabei eine Standardabweichung von $4,5 \cdot 10^{-3}$.

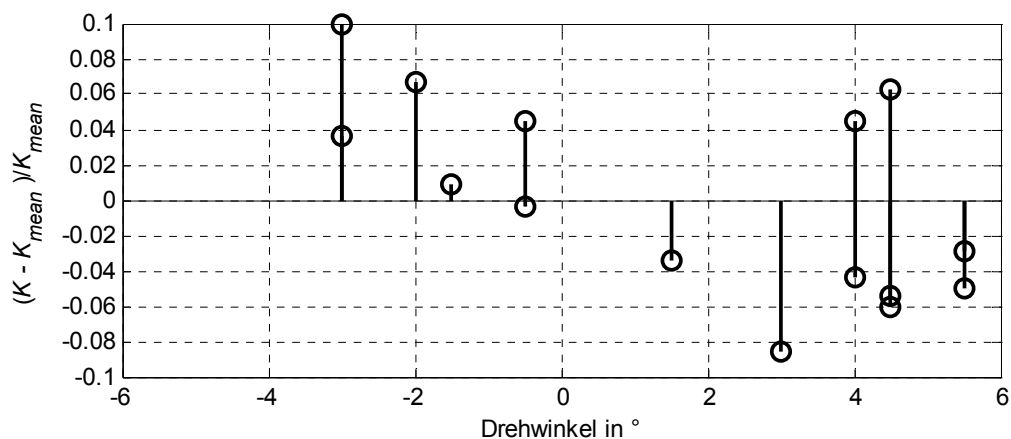


Abbildung 5.5: Abweichung des berechneten Kontrastwertes vom Mittelwert über dem Drehwinkel.

In Abbildung 5.6 ist für eine reduzierte Anzahl an Variationsschritten die kumulierte Häufigkeitsverteilung der mittleren Grauwerte über die Breite der aufgenommenen Bilder dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Median der Grauwerte deutlich zwischen 79 und 88 variiert. Die Streuung des Medians ist bei der Variation des Drehwinkels größer als bei der Variation des Parallelversatzes, wobei kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Drehrichtung beziehungsweise der Richtung des lateralen Versatzes und der Veränderung des Medians zu erkennen ist.

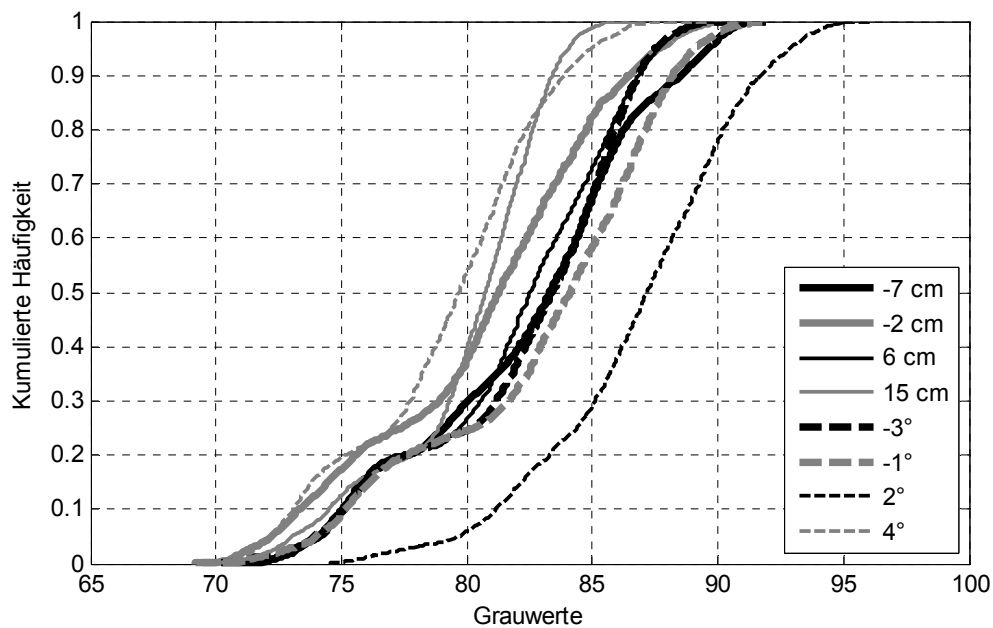


Abbildung 5.6: Kumulierte Häufigkeit der Grauwerte der Bilder bei Variation der lateralen Position sowie des Drehwinkels des Fotozells.

Reproduzierbarkeit der Licht- und Sichtverhältnisse

Abbildung 5.7 zeigt die Abweichung des berechneten Kontrastwertes vom Mittelwert bei neun Aufnahmen derselben Stelle. Sämtliche Kamera- und Blitzeinstellungen sind unverändert, das Fotozelt wurde nicht bewegt und die Größe des Bildausschnitts ist konstant. Die Wiederholung der Aufnahme erfolgte manuell. Es ist zu erkennen, dass die relativen Abweichungen der berechneten Kontrastwerte vom Mittelwert zwischen 0,7 und 8,4 % betragen. Absolut ergibt sich eine Standardabweichung der Kontrastwerte von $4,5 \cdot 10^{-3}$.

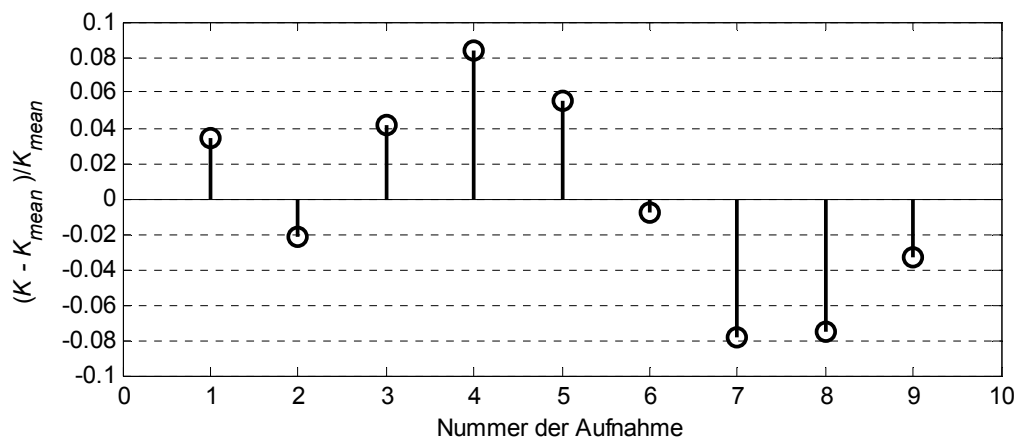


Abbildung 5.7: Abweichung des berechneten Kontrastwertes vom Mittelwert über der Anzahl an Aufnahmen.

In Abbildung 5.8 ist die kumulierte Häufigkeit der mittleren Grauwerte über der Breite der Bilder dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich der Kontrastumfang kaum unterscheidet, aber der Median zwischen einem Grauwert von 82 und 86 variiert.

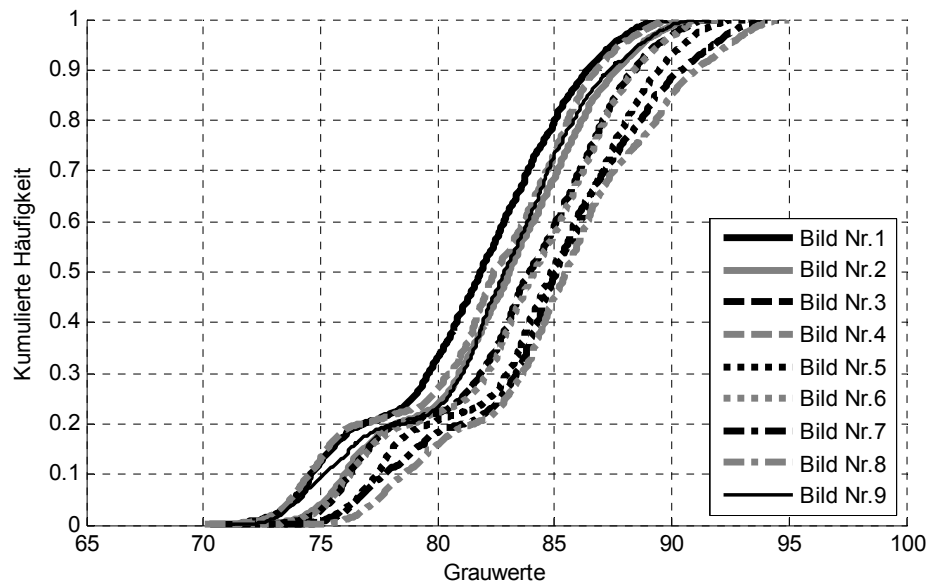


Abbildung 5.8: Kumulierte Häufigkeit der Grauwerte der Bilder bei wiederholter Aufnahme.

5.1.2 Einfluss der Bildverarbeitung

Neben Unsicherheiten bei der Bildaufnahme können auch Unsicherheiten bei der Bildnachbearbeitung entstehen, wenn beispielsweise das Foto zur Beseitigung von Störstellen (zum Beispiel Fahrbahnmarkierungen oder andere Spuren) zugeschnitten wird. Die Berechnung der im Folgenden dargestellten Kontrastwerte wurde immer auf Basis desselben Fotos vorgenommen, dessen Breite beziehungsweise Höhe bezüglich der Bildmitte wie in Abbildung 5.9 dargestellt variiert wurde.

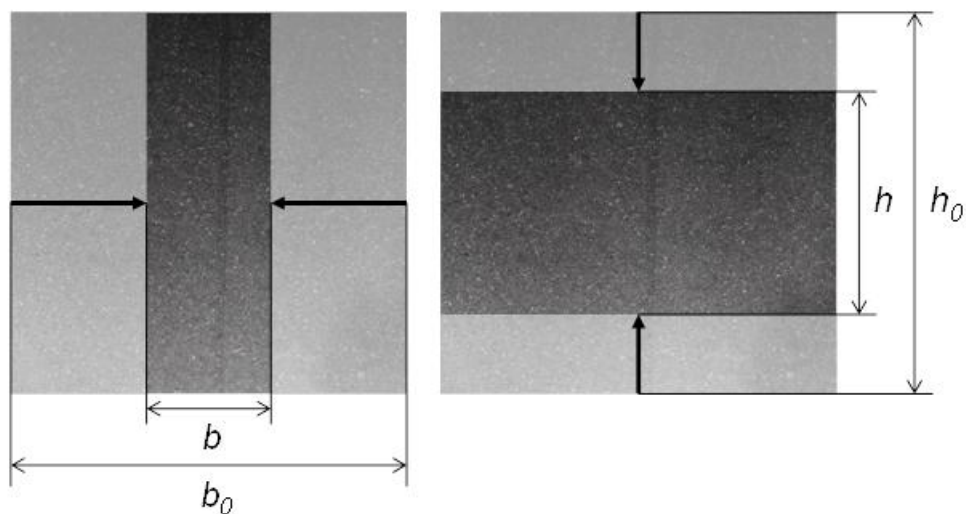


Abbildung 5.9: Variation der Höhe und der Breite des Bildzuschnitts.

Abbildung 5.10 zeigt die Abweichung des berechneten Kontrastwertes vom Mittelwert bei Verringerung der Breite des Bildausschnitts, die bis zu 6,7 % beträgt. Absolut ergibt sich eine Standardabweichung der Kontrastwerte von $2 \cdot 10^{-3}$.

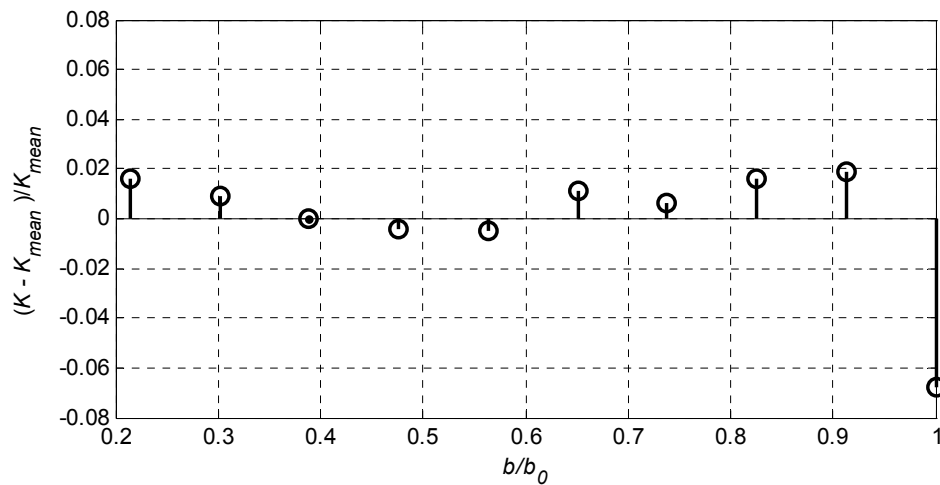


Abbildung 5.10: Abweichung des berechneten Kontrastwertes vom Mittelwert in Abhängigkeit der Breite des Bildausschnitts.

Abbildung 5.11 zeigt die kumulierte Häufigkeit der Grauwerte bei Reduzierung der Breite des Bildausschnitts. Es ist zu erkennen, dass der Median der Grauwerte zu einem Breitenverhältnis von 0,83 fast konstant bei einem Grauwert von 82 bleibt und dann bis 86 zunimmt. Gleichzeitig sinkt der Kontrastumfang des Bildes, wobei vor allem die Anzahl niedriger Grauwerte abnimmt. Dies lässt darauf schließen, dass das Bild an den Rändern dunkler ist.

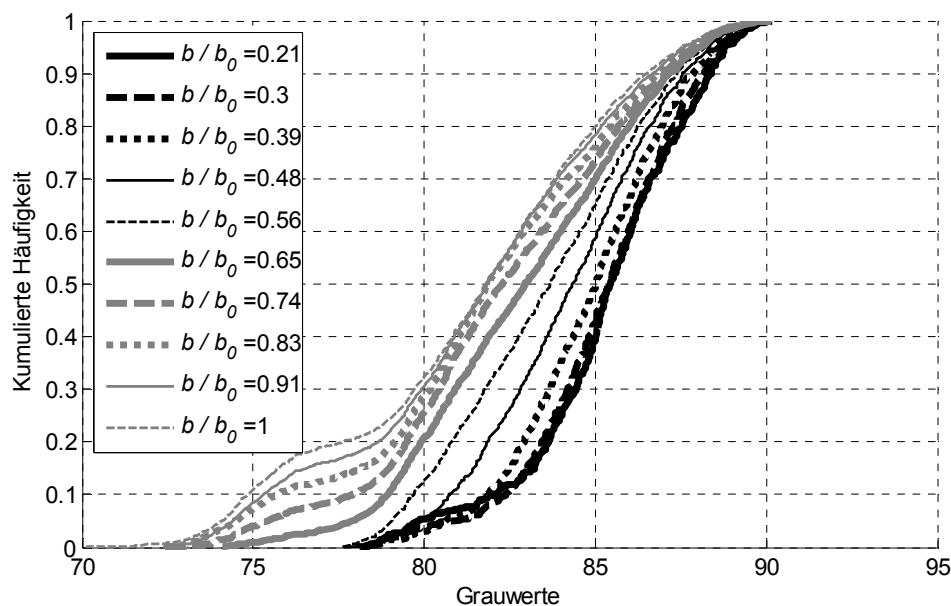


Abbildung 5.11: Kumulierte Häufigkeit der Grauwerte des Bildes bei Verringerung der Breite des Bildausschnitts.

In Abbildung 5.12 ist die Abweichung des berechneten Kontrastwerts vom Mittelwert bei Variation der Höhe des Bildausschnitts dargestellt. Diese beträgt zwischen 0,3 % und 13,4 %. Die absolute Standardabweichung der Kontrastwerte beträgt $5 \cdot 10^{-3}$.

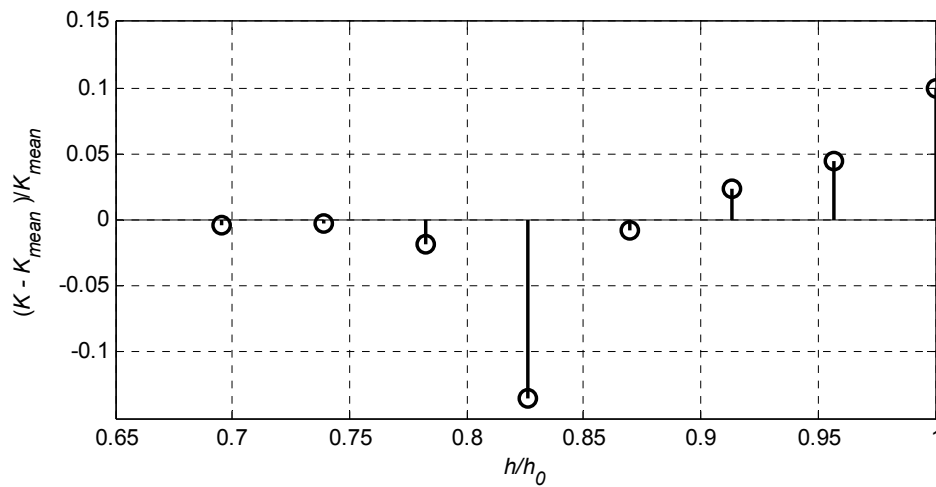


Abbildung 5.12: Abweichung des berechneten Kontrastwertes vom Mittelwert in Abhängigkeit der Höhe des Bildausschnitts.

Abbildung 5.13 zeigt dazu die kumulierte Häufigkeit der Grauwerte bei Reduzierung der Höhe des Bildausschnitts. Es ist zu erkennen, dass der Median mit abnehmender Bildhöhe von 82 auf 81 sinkt. Der Kontrastumfang wird ebenfalls mit abnehmender Bildhöhe reduziert, wobei die Anzahl niedriger und hoher Grauwerte in etwa gleichem Maße abnimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Bild aufgrund der Belichtung am unteren Rand heller und am oberen Rand dunkler ist.

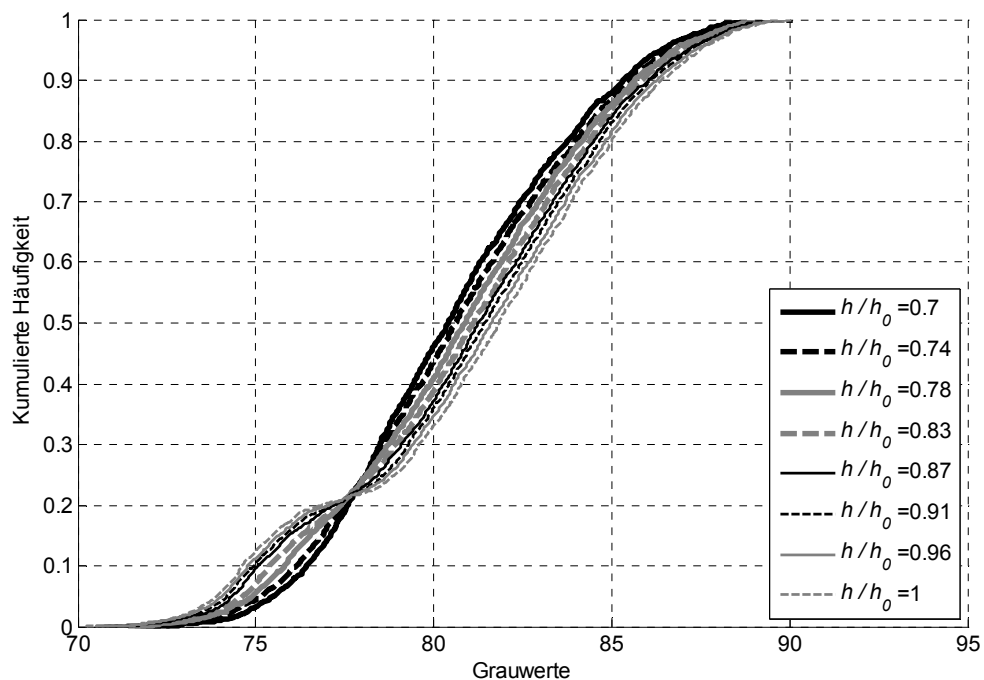


Abbildung 5.13: Kumulierte Häufigkeit der Grauwerte des Bildes bei Verringerung der Höhe des Bildausschnitts.

5.1.3 Zwischenfazit

Die Ergebnisse zeigen, dass von den untersuchten Einflussfaktoren der Aufnahme- und Lichtwinkel, wie vermutet, den höchsten Einfluss auf die Sichtbarkeit der Reibspur haben und im untersuchten Variationsbereich zu Abweichungen vom maximal bestimmbar Kontrast der Spur bis zu 80 % führen. Der höchste Kontrast hat sich bei der Aufnahme der Spur in Reibrichtung bei Belichtung aus derselben Richtung gezeigt. Als weiterer entscheidender Einflussfaktor kann die Belichtung genannt werden, die im untersuchten Variationsbereich zu Abweichungen vom maximalen Kontrastwert bis über 50 % ausgemacht hat. Aufnahmen unter diffusem Licht haben dabei zu deutlich höheren Kontrastwerten geführt als bei direktem Licht. Damit bestätigt sich die Annahme, dass die Aufnahmebedingungen hinsichtlich Kamerapositionierung und Lichtverhältnisse konstant sein müssen, um vergleichbare Kontrastwerte bestimmen zu können.

Die Untersuchung von Unsicherheiten der Positionierung des Fotozeltes bei der Bildaufnahme zeigt, dass es auch bei festgelegten Sollwerten für die Aufnahme- und Belichtungseinstellung zu Schwankungen des berechneten Kontrastwertes einer Spur von bis zu 10 % kommen kann, wenn die laterale Position sowie der Winkel des Zeltes um die Hochachse bei Positionierung nach Augenmaß schwankt. Hierbei ist allerdings kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Höhe der Abweichung des Kontrastes zur Höhe des Querversatzes oder des Drehwinkels erkennbar. Da sich auch bei unveränderter Zeltposition, aber wiederholter Bildaufnahme Schwankungen des Kontrastwertes der Spuren auf den einzelnen Bildern von bis zu 9% zeigen, ist nicht klar zu trennen, ob die Kontrastabweichungen wirklich auf die Positionierung des Zeltes zurückgehen oder auf die Wiederholgenauigkeit. Es wird daher ein Toleranzbereich der Kontrastwerte von $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ angenommen, in dem sich die Intensität einer Spur mit dem verwendeten Verfahren reproduzierbar bestimmen lässt.

Hinsichtlich des bestimmten Sichtbarkeitsfaktors kann nur ein Vergleich von Aufnahmeposition und Lichtbedingungen innerhalb der gegebenen Rahmenbedingungen getroffen werden. Der Variationsspielraum, beispielsweise bezüglich der Belichtungsmöglichkeiten oder des Kamerawinkels und -abstandes, stehen wiederum im Zielkonflikt mit der Praxistauglichkeit des Verfahrens (zum Beispiel Dimensionen des Fotozelts). Abbildung 5.14 zeigt eine Reifenspur unter subjektiv optimalen Sichtbedingungen (Abstand >10 m, Winkel < 30°, linkes Foto) und den mit dem gewählten Verfahren aufgenommenen Ausschnitt derselben Spur (rechts Foto) im Vergleich. Die Spur ist auf dem linken Bild deutlich besser zu erkennen. Dies bedeutet konkret, dass der Sichtbarkeitsfaktor κ im Bezug auf die Intensität einer Reifenspur unter optimalen Sichtbedingungen in dem Fotozelt kleiner 1 ist. Dementsprechend muss eine Reifenspur eine höhere tatsächliche Intensität besitzen, um unter den gewählten Aufnahmebedingungen detektiert werden zu können, als dies unter optimalen Sichtbedingungen der Fall wäre. Durch eine umfangreichere Untersuchung und Variation der Kamera- und der Belichtungseinstellungen lässt sich vermutlich auch bei Aufnahmen in dem Fotozelt der Sichtbarkeitsfaktor noch weiter steigern. Die im Rahmen dieser Arbeit bestimmten

Kontrastwerte und Spurzeichnungssensitivitäten gelten daher quantitativ nur unter den gegebenen Aufnahmebedingungen.

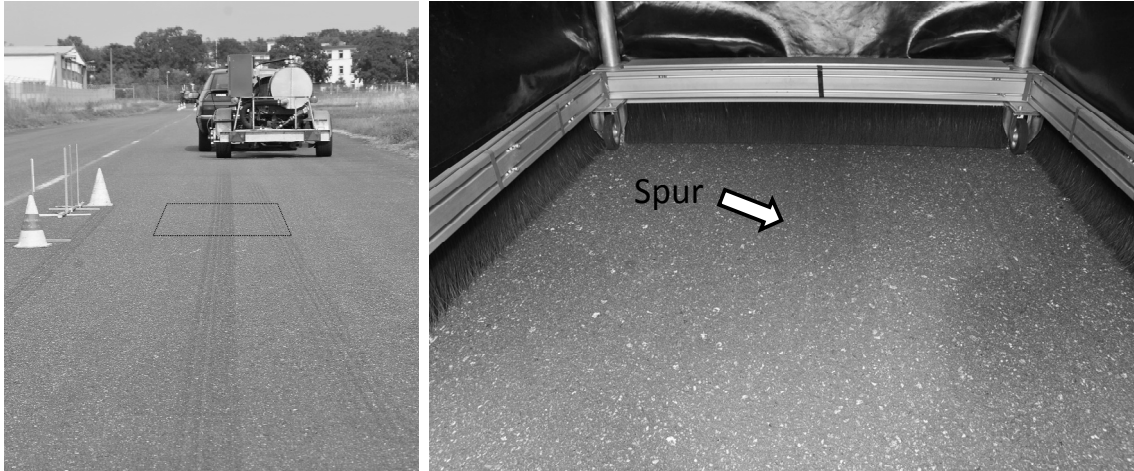


Abbildung 5.14: Spur unter subjektiv optimalen Sichtbedingungen (links) und unter kontrollierten Sichtbedingungen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei konstanter Kameraposition, Kameraeinstellungen, Lichtposition, sowie Belichtungsart und -stärke eine objektive und zuverlässige Bestimmung des Spurkontrasts möglich ist. Die Dimensionen des Bildausschnitts haben in dem untersuchten Variationsbereich nur einen geringen Einfluss.

5.2 Reifen- und Fahrbahneigenschaften

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen mit VERINA hinsichtlich verschiedener reifen- und fahrbahnseitiger Einflussfaktoren auf die Spurzeichnungssensitivität sowie bei separater Betrachtung von Verschleiß- und Schwärzungsrate vorgestellt. Diese basieren auf drei Versuchsreihen:

Versuchsreihe 2.1: Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Reifen-Fahrbahnkombinationen auf Verschleiß und Schwärzung sowie die resultierende Spurzeichnungssensitivität wurden Normalkraft (160 N bis 560 N mit $\Delta F = 100$ N) und Gleitgeschwindigkeit (0,1 m/s, 0,5 m/s, 1 m/s, 2, m/s, 3 m/s) für vier unterschiedliche Reifen und auf drei unterschiedlichen Fahrbahnen variiert.

Versuchsreihe 2.2: Die Untersuchung des Einflusses der Gleitgeschwindigkeit erfolgte durch eine im Vergleich zu Versuchsreihe 2.1 wesentlich feinere Abstufung der Gleitgeschwindigkeiten (0,2 m/s bis 3 m/s mit $\Delta v = 0,4$ m/s) bei Variation der Normalkraft (100 N bis 500 N mit $\Delta F = 100$ N) für vier unterschiedliche Reifen auf einer konstanten Fahrbahn.

Versuchsreihe 2.3: Die von der Flächenpressung unabhängige Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Verschleiß und Reibkraft erfolgte durch Variation der Normal-

kraft (100 N, 200 N und 400 N) und der Profilelementfläche (500 mm², 1000 mm² und 2000 mm²) für einen Reifen auf einer Fahrbahn.

Eine Übersicht der durchgeführten Versuche mit einem Verweis auf die Ergebnisdarstellung zeigt Tabelle 5.2.

Tabelle 5.2: Übersicht der durchgeführten Versuche zu Verschleiß und Schwärzung.

Versuchsreihe	Variationsgröße	Reifen ¹⁶⁶	Fahrbahn	Darstellungen
2.1	F_z, v_{rel}	CS	alter Asphalt	Abbildung 5.23, Abbildung A.10
			neuer Asphalt	Abbildung 5.23, Abbildung A.10
			Beton	Abbildung 5.23, Abbildung A.10
		CE	alter Asphalt	Abbildung 5.22, Abbildung 5.25, Abbildung 5.29
			neuer Asphalt	Abbildung 5.22, Abbildung 5.25, Abbildung 5.29
			Beton	Abbildung 5.22, Abbildung 5.25, Abbildung 5.29
		GE	alter Asphalt	Abbildung 5.26, Abbildung 5.30, Abbildung A.9
			neuer Asphalt	Abbildung 5.26, Abbildung 5.30, Abbildung A.9
			Beton	Abbildung 5.26, Abbildung 5.30, Abbildung A.9
		PS ¹⁶⁷	alter Asphalt	Abbildung A.8, Abbildung A.11
			neuer Asphalt	Abbildung A.8
2.2	F_z, v_{rel}	CS	alter Asphalt	Abbildung 5.15, Abbildung 5.20, Abbildung 5.21, Abbildung 5.24, Abbildung 5.27, Abbildung A.1
		CE		Abbildung 5.21, Abbildung 5.24, Abbildung 5.27, Abbildung A.2, Abbildung A.5
		GE		Abbildung 5.21, Abbildung 5.24, Abbildung 5.27, Abbildung A.3, Abbildung A.6
		PS		Abbildung 5.21, Abbildung 5.24, Abbildung 5.27, Abbildung A.4, Abbildung A.7
2.3	F_z, A_{PE}	CS	alter Asphalt	Abbildung 5.19

¹⁶⁶ CS = ContiSportContact 3, CE = ContiEcoContact 3, GE = Goodyear Excellence, PS = Pirelli Sottozero W210

¹⁶⁷ Versuche mit PS-Reifen unvollständig wg. Beschädigung an VERINA während der Durchführung.

5.2.1 Verschleißrate

Flächenpressung

Abbildung 5.15 zeigt beispielhaft den flächenbezogenen Masseverlust $\rho \cdot h_V$ eines Profilausschnittes des ContiSportContact 3 auf der alten Asphaltfahrbahn als Funktion der Flächenpressung für drei verschiedene Reibgeschwindigkeiten. Es ist, wie auch bei den anderen Reifen¹⁶⁸ zu erkennen, dass der Verschleiß deutlich mit zunehmender Flächenpressung aufgrund zunehmender Normalkraft bei konstanter Fläche des Profilelements ansteigt. Die Streuweite¹⁶⁹ der Verschleißwerte beträgt bis zu 2,4 mg/mm². Der zu Vergleichszwecken mit den realen Reifen relevante Flächenpressungsbereich (vgl. Abbildung 4.10) liegt bei einem Reifeninnendruck von 2,5 bar (250 kPa) bei Werten um die 450 kPa.

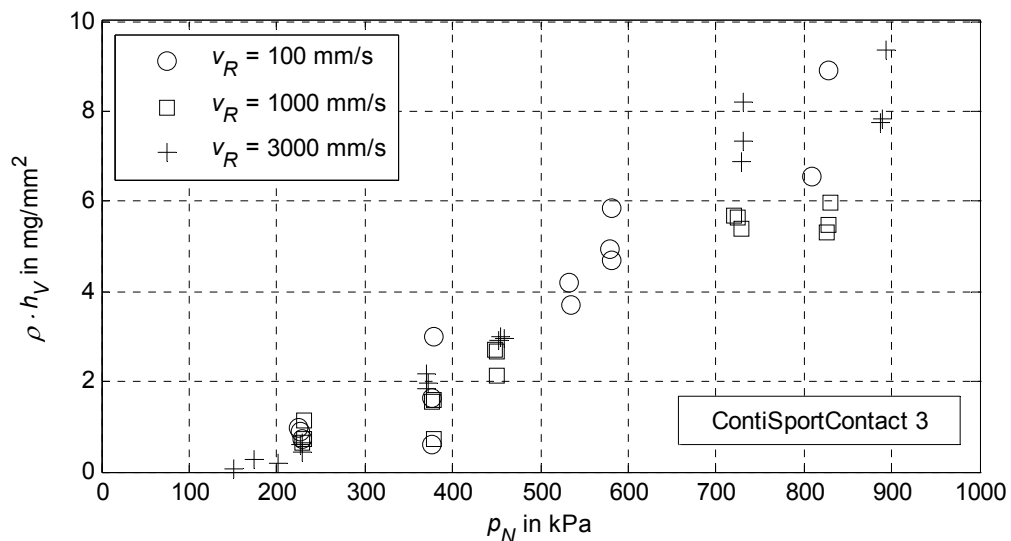


Abbildung 5.15: Flächenbezogener Masseverlust über der Flächenpressung für verschiedene Reibgeschwindigkeiten.

In Abbildung 5.16 sind die Messdaten mit einer proportionalen Funktion der Form $f(x) = a \cdot x$ angenähert und in Abbildung 5.17 mit einer Potenzfunktion der Form $g(x) = a \cdot x^n$ nach Gleichung (3.24) doppellogarithmisch aufgetragen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist bei Annäherung mit der Potenzfunktion um 9 % bis 12 % höher.

¹⁶⁸ siehe Anhang A.1

¹⁶⁹ definiert als Differenz zwischen maximalem und minimalem Messwert eines Messpunkts (konstante Sollwerte).

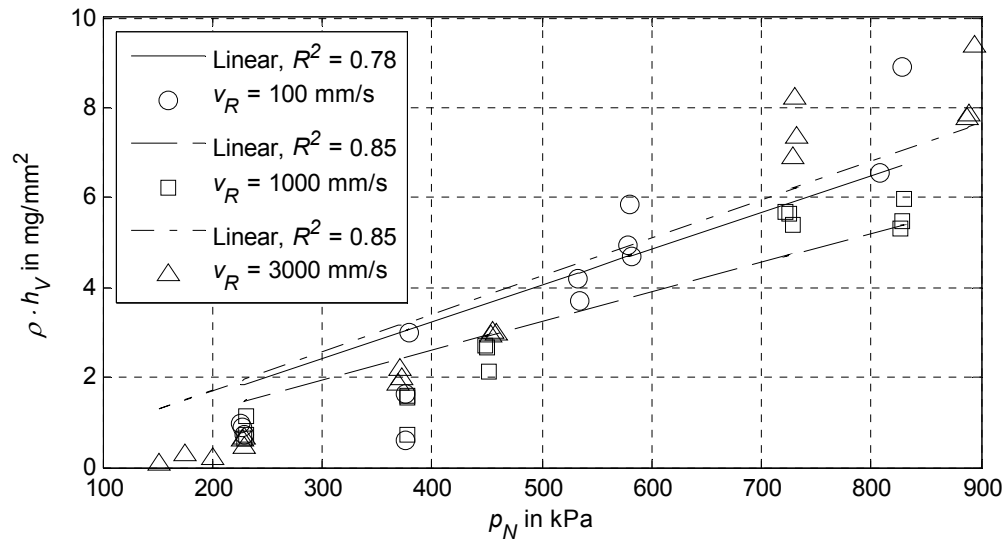


Abbildung 5.16: Messdaten mit linearer Ansatzfunktion genähert.

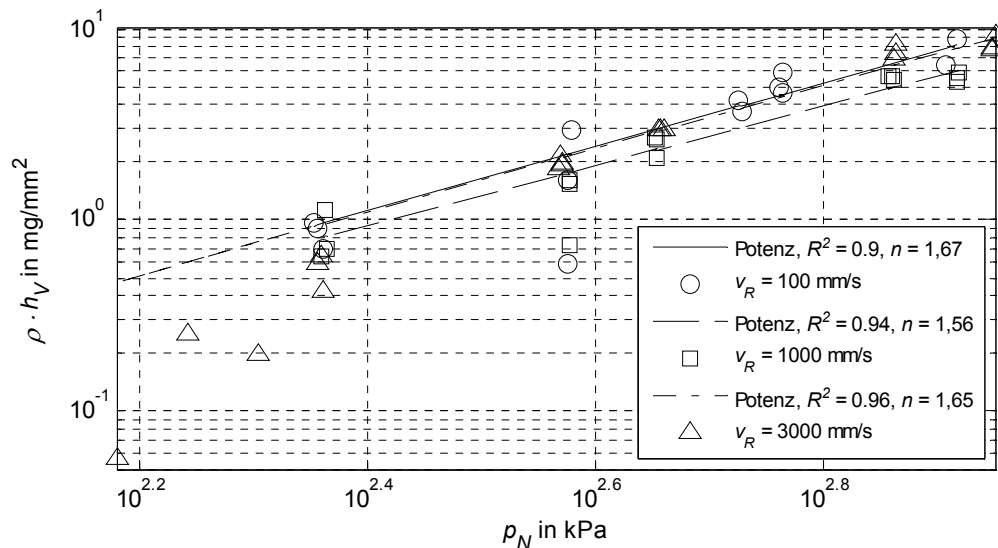


Abbildung 5.17: Messdaten mit Potenzfunktion genähert.

Zur Untersuchung des Verschleißes in Abhängigkeit der Normalkraft, aber unabhängig von der Flächenpressung, wurde diese bei Erhöhung der Normalkraft durch die Variation der Profilelementfläche annähernd konstant gehalten. Dabei kamen vier unterschiedliche Profileausschnitte des ContiSportContact 3 zum Einsatz, deren Solldimensionen in Abbildung 5.18 im Vergleich zu den Abdrücken der realen Ausschnitte dargestellt sind. Aufgrund der Fertigungsgenauigkeit mit den verfügbaren Werkzeugen und dem Profilenegativanteil weichen die tatsächlichen Dimensionen entsprechend Tabelle 5.3 ab. Die Sollwerte der Flächenpressung in Abbildung 5.19 ergeben sich aus der Division der vorgegebenen Normalkraft (100, 200 und 400 N) und der Sollwerte der Flächen der vier Profilelemente.

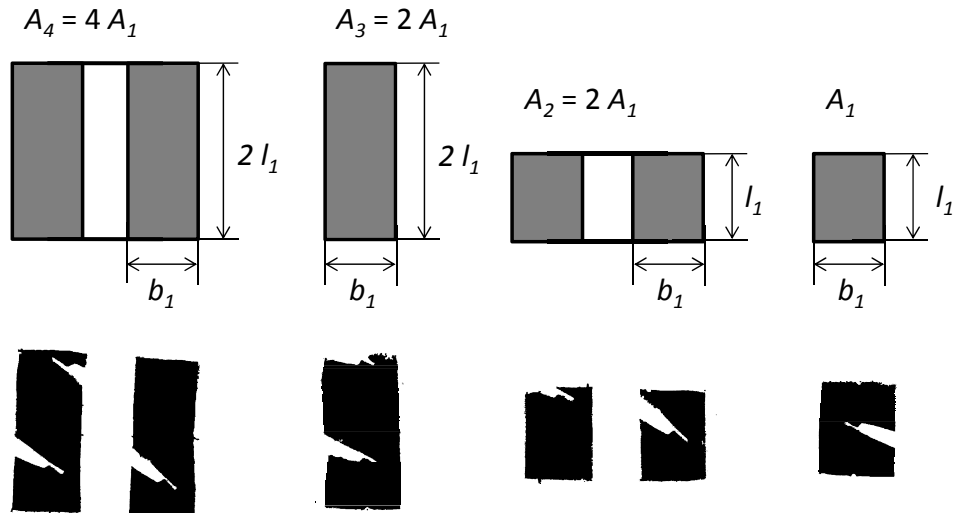


Abbildung 5.18: Verwendete Profilausschnitte: Solldimension (oben) und Abdrücke der realen Ausschnitte (unten).

Tabelle 5.3: Abmessungen der realen Profilausschnitte

Profilausschnitt	1	2	3	4
Länge/ mm (soll/ist)	25/30	25/31	50/49	50/50
effektive Breite /mm (soll/ist)	20/24	40/42	20/24	40/42
Kontaktfläche /mm ² (soll/ist)	500/633	1000/1088	1000/1042	2000/1896

Abbildung 5.19 zeigt den flächenbezogenen Masseverlust in Abhängigkeit der breitenbezogenen Normalkraft bei Variation der Flächenpressung. Es ist zu erkennen, dass die Differenz der Verschleißhöhe bei konstanter Normalkraft zwischen verschiedenen Flächenpressungen mit steigender Differenz der Flächenpressungen zunimmt.

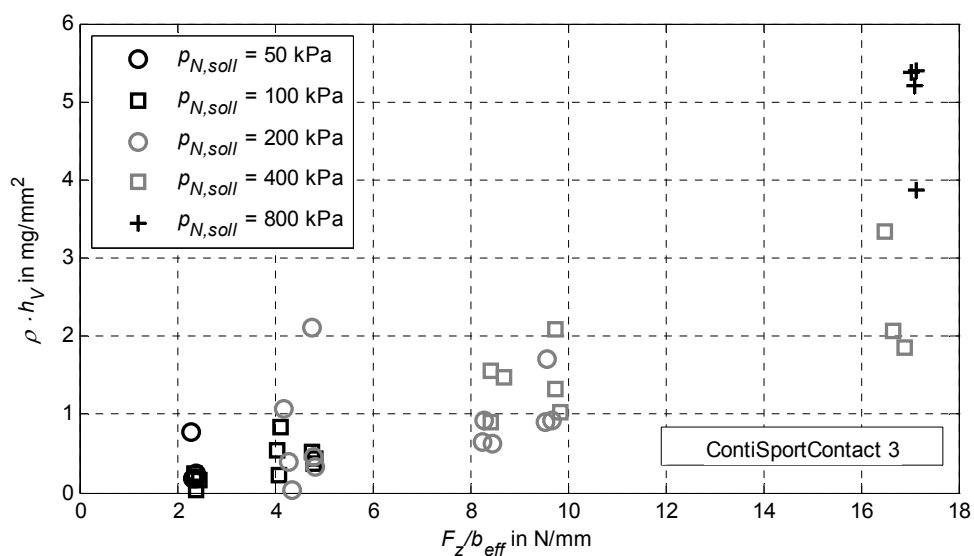


Abbildung 5.19: Flächenbezogener Masseverlust über der Normalkraft/Breite für verschiedene konstante Flächenpressungen.

Reibgeschwindigkeit

In Abbildung 5.20 ist beispielhaft für einen der Reifen (ContiSportContact 3) der flächenbezogene Massenverlust über der Gleitgeschwindigkeit v_R für verschiedene Flächenpressungen aufgetragen. Bei einer Normalkraft von 100 und 200 N ($p_N = 128$ und 256 kPa) ist der Verschleiß etwa gleich groß und über den untersuchten Variationsbereich der Geschwindigkeit annähernd konstant. Bei Erhöhung der Normalkraft steigt die Verschleißhöhe deutlich an. Die Streuung der absoluten Verschleißwerte nimmt dabei deutlich zu. Ein eindeutiger Trend hinsichtlich einer Zu- oder Abnahme der Verschleißhöhe mit der Gleitgeschwindigkeit lässt sich bei keinem der Reifen¹⁷⁰ erkennen.

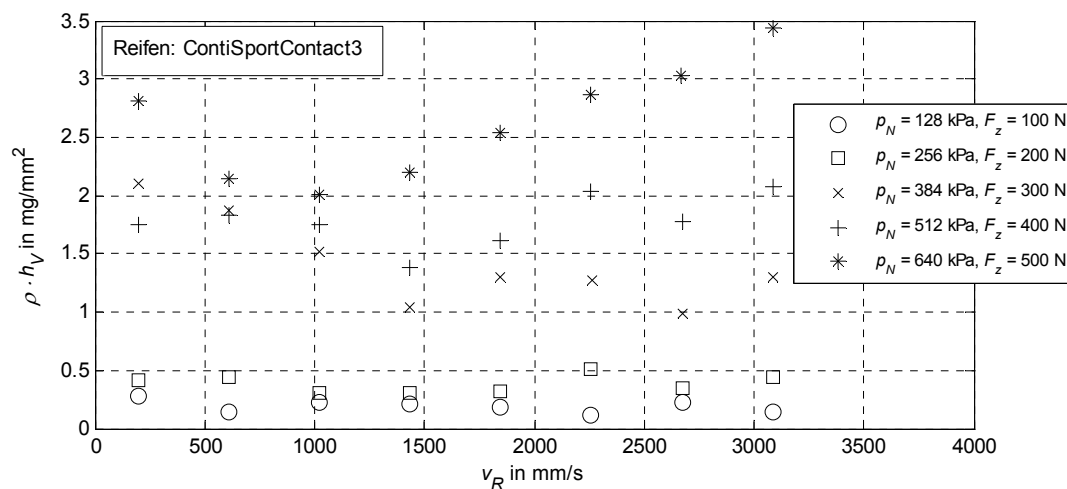


Abbildung 5.20: Flächenbezogener Masseverlust über der Gleitgeschwindigkeit für verschiedene Flächenpressungen.

Reifen

Abbildung 5.21 zeigt den flächenbezogenen Masseverlust über der breitenbezogenen Reibkraft für vier verschiedene Reifen auf dem alten Asphalt bei einer Gleitgeschwindigkeit von 3 m/s und die Annäherung der Messwerte mit einer linearen Funktion zur Ermittlung der mittleren massenbezogenen Verschleißrate¹⁷¹. Unterschiede zwischen dem ContiSportContact 3 und dem ContiEcoContact 3 lassen sich innerhalb des Streubereiches der Werte bis etwa 10 N/mm kaum erkennen. Darüber treten größere Unterschiede auf. Die geringste Zunahme des Verschleißes zeigt der Pirelli Sottozero W210, die höchste der Goodyear Excellence.

¹⁷⁰ vgl. Anhang A.1.2

¹⁷¹ definiert als das Produkt der Dichte ρ des Gummis und der volumenbezogenen Verschleißrate γ

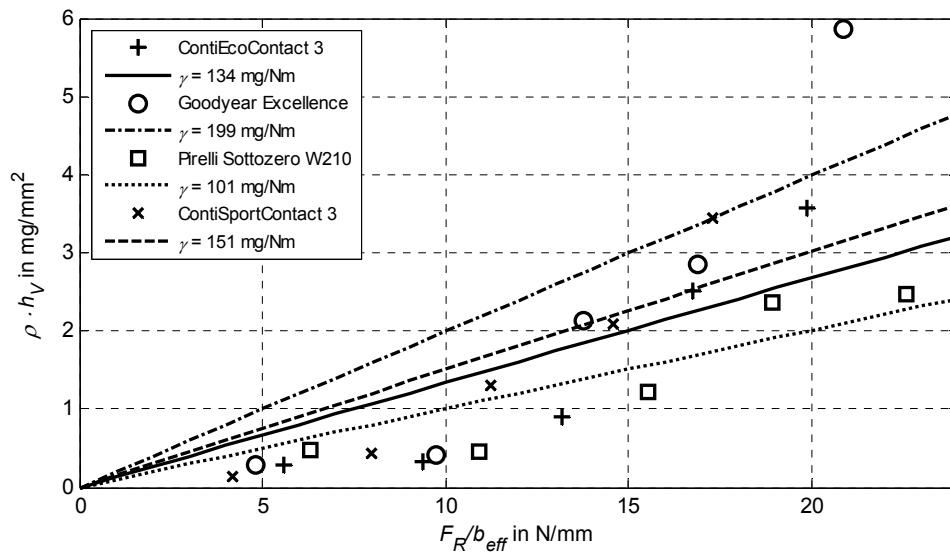


Abbildung 5.21: Flächenbezogener Masseverlust über Reibkraft/Breite für die vier Versuchsreifen bei einer Gleitgeschwindigkeit von 3 m/s auf dem alten Asphalt.

Fahrbahn

In Abbildung 5.22 ist der flächenbezogene Masseverlust eines Profilausschnitts des ContiEcoContact 3 und in Abbildung 5.23 für den ContiSportContact 3 für drei verschiedene Fahrbahnbeläge und die Annäherung der Messwerte mit einer linearen Funktion zur Ermittlung der mittleren Verschleißrate dargestellt. Während sich die Verschleißrate beider Reifen auf der gleichen Fahrbahn zwischen 5 % (alter Asphalt) und 30 % (Beton) unterscheiden, zeigt der neue Asphalt bei beiden Reifen eine etwa 1,3-fach bis doppelt so hohe Verschleißrate wie die Betonfahrbahn und der alte Asphalt sogar eine sechs- bis achtmal so hohe Verschleißrate wie die Betonfahrbahn.

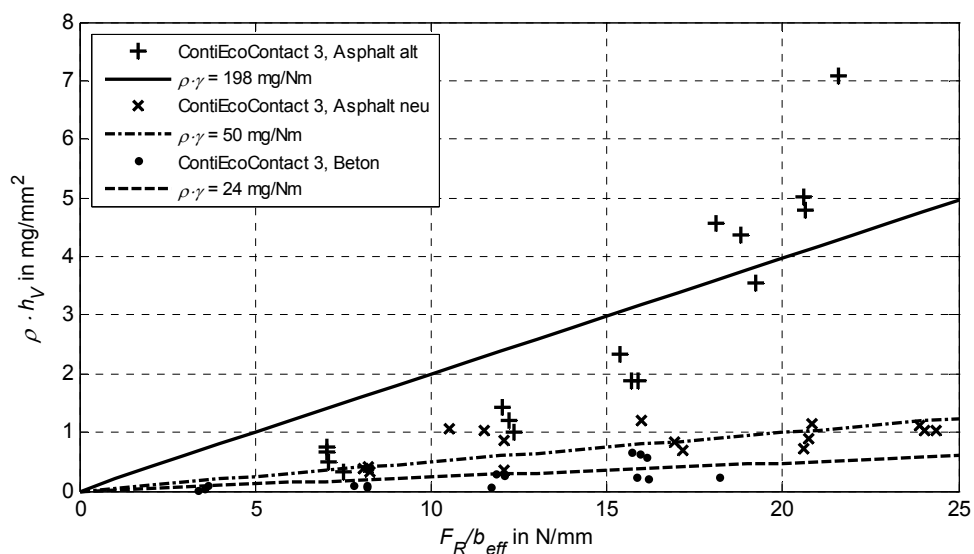


Abbildung 5.22: Flächenbezogener Masseverlust über der Flächenpressung für den ContiEcoContact 3 auf drei verschiedenen Fahrbahnen bei einer konstanten Gleitgeschwindigkeit von $v_R = 1$ m/s.

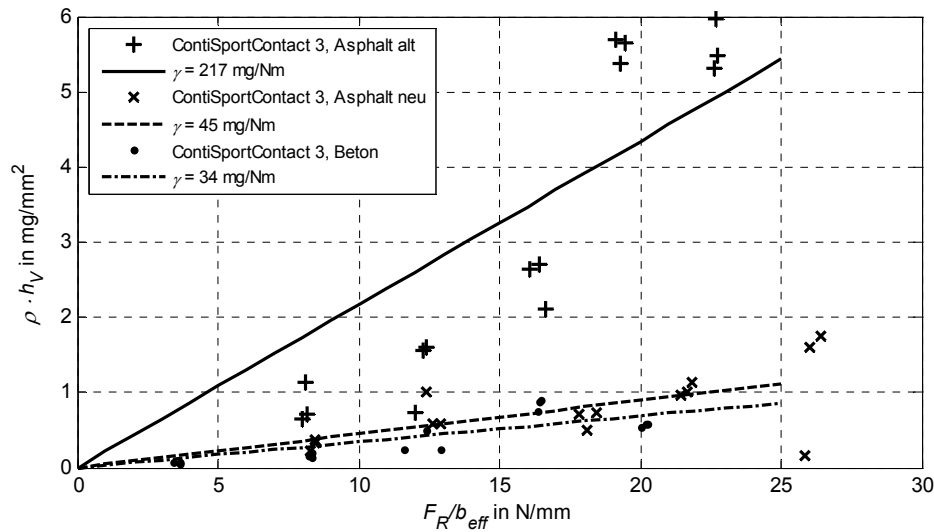


Abbildung 5.23: Flächenbezogener Masseverlust über der Flächenpressung für den ContiSportContact 3 auf drei verschiedenen Fahrbahnen bei einer konstanten Gleitgeschwindigkeit von $v_R = 1$ m/s.

5.2.2 Schwärzungsrate

Reifen

Abbildung 5.24 zeigt den relativen Kontrast der Spuren von Profilausschnitten vier verschiedener Reifen über dem flächenbezogenen Masseverlust auf dem alten Asphalt. Die Spuren wurden unter Variation der Normalkraft von 100 bis 500 N bei einer Gleitgeschwindigkeit von 3 m/s (entspricht ca. 11 % Gleitschlupf bei 100 km/h) erzeugt. Innerhalb der Streuweite der Verschleißwerte von $2,4 \text{ mg/mm}^2$ ist ein Anstieg des Kontrastes mit zunehmender Verschleißhöhe zu erkennen. Deutliche Unterschiede zwischen den vier Reifen sind nicht erkennbar.

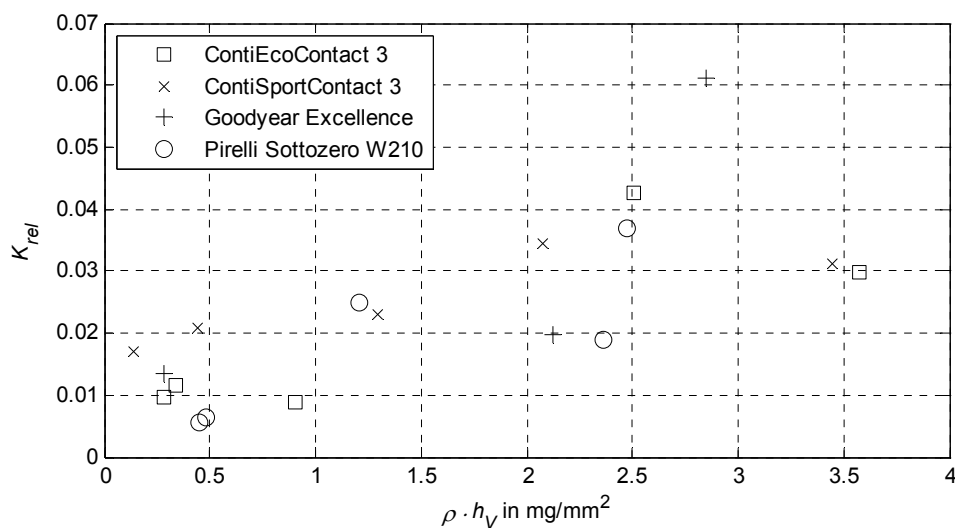


Abbildung 5.24: Relativer Kontrast über dem flächenbezogenen Masseverlust für vier verschiedene Reifen auf dem alten Asphalt.

Fahrbahn

In Abbildung 5.25 ist der relative Kontrast der Spuren eines Profilausschnitts des ContiEcoContact 3 und in Abbildung 5.26 des Goodyear Excellence für drei verschiedene Fahrbahnen zusammen mit der Annäherung der Messdaten mit einer linearen Funktion zur Bestimmung der mittleren Schwärzungsrate ξ dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Schwärzungsraten zwischen den Reifen auf gleicher Fahrbahn kaum unterscheiden. Die Schwärzungsrate auf Beton ist bei beiden Reifen am höchsten und zwischen elf- und dreizehnmal so hoch wie auf dem alten Asphalt. Die Schwärzungsrate auf dem neuen Asphalt ist bei beiden Reifen zwischen sieben- und zehnmal so hoch wie bei dem alten Asphalt und zwischen 18 und 32 % kleiner als die Schwärzungsrate auf Beton.

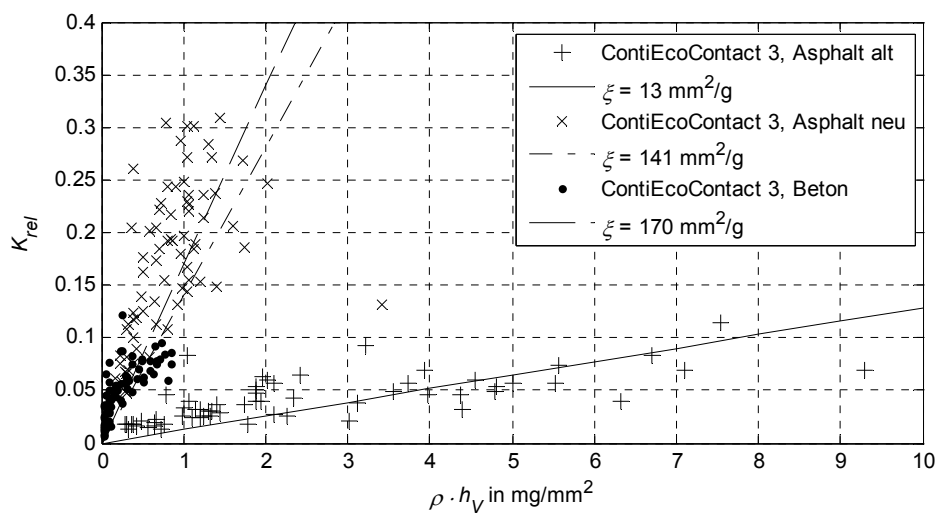


Abbildung 5.25: Relativer Kontrast über dem flächenbezogenen Masseverlust des ContiEcoContact 3 für drei verschiedene Fahrbahnen.

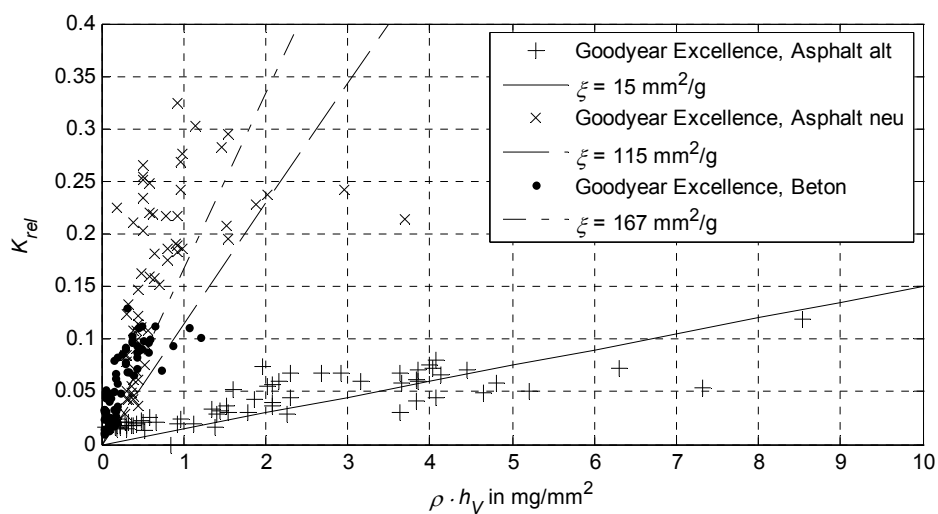


Abbildung 5.26: Relativer Kontrast über dem flächenbezogenen Masseverlust des Goodyear Excellence für drei verschiedene Fahrbahnen.

5.2.3 Spurzeichnungssensitivität

Reifen

Abbildung 5.27 zeigt den relativen Kontrast der Spuren von Profilausschnitten vier verschiedener Reifen auf dem alten Asphalt in Abhängigkeit der breitenbezogenen Reibkraft sowie die Näherung der Messdaten mit einer linearen Funktion zur Ermittlung der mittleren Spurzeichnungssensitivität. Der relative Messfehler bei der Bestimmung der Reibkraft beträgt für die VERINA-Experimente 6 %, was absolut einem Fehler von bis zu 1,5 N/mm im Variationsbereich entspricht. Innerhalb des Messfehlers der Reibkraft und der Streuweite der Kontrastwerte von $1,5 \cdot 10^{-2}$ sind nur geringe Unterschiede zwischen den Reifen erkennbar. Die im Mittel kleinsten Kontrastwerte zeigt der Pirelli Sottozero und die höchsten der Goodyear Excellence.

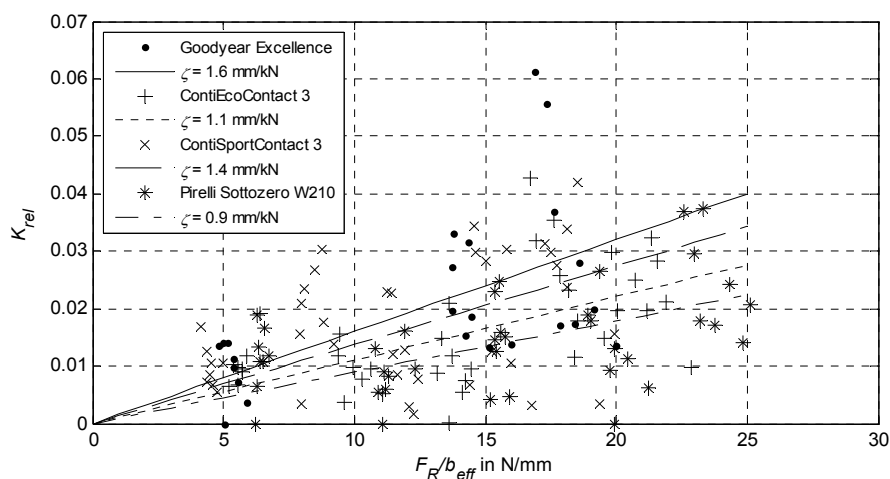


Abbildung 5.27: Relativer Kontrast über der breitenbezogenen Reibkraft für vier verschiedene Reifen auf altem Asphalt

Fahrbahn

Abbildung 5.28 zeigt Fotos von drei Spuren des gleichen Profilausschnitts mit VERINA bei gleichen Sollwerten der Normalkraft und Reibgeschwindigkeit auf drei verschiedenen Fahrbahnen.

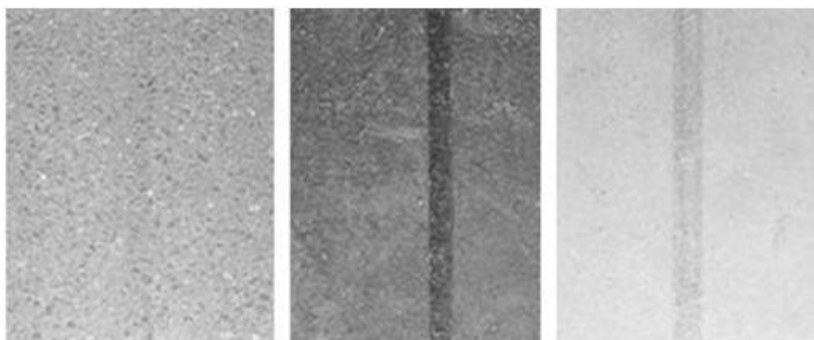


Abbildung 5.28: VERINA-Spuren des ContiSportContact 3 ($F_z = 460$ N, $v_R = 1$ m/s) auf dem alten Asphalt (links), dem neuen Asphalt (Mitte) und der Betonfahrbahn (rechts).

In Abbildung 5.29 ist der Kontrast von Spuren mit VERINA des ContiEcoContact 3 und in Abbildung 5.30 des Goodyear Excellence über der breitenbezogenen Reibkraft für drei verschiedene Fahrbahnen aufgetragen. Die Messdaten sind mit einer proportionalen Funktion zur Ermittlung der mittleren Spurzeichnungssensitivität genähert. Die Spurzeichnungssensitivität unterscheidet sich bei beiden Reifen auf der gleichen Fahrbahn kaum. Der Unterschied zwischen den Fahrbahnbelägen ist bei beiden Reifen deutlich größer. Die Spurzeichnungssensitivität auf Beton ist etwa 1,6- bis 1,9-mal höher als auf dem alten Asphalt, die Werte auf dem neuen Asphalt sind fast viermal höher.

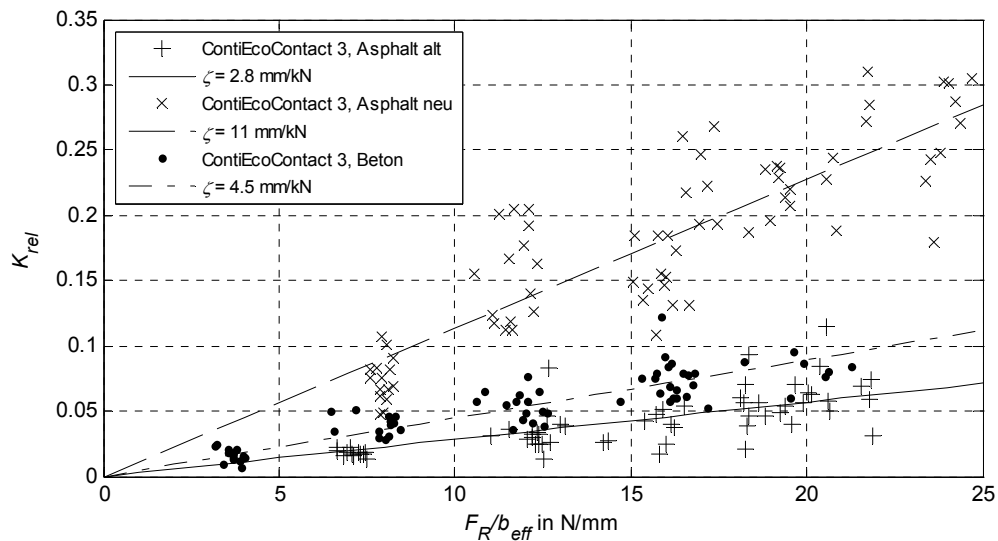


Abbildung 5.29: Relativer Kontrast über der breitenbezogenen Reibkraft für den ContiEcoContact 3 und drei verschiedene Fahrbahnen.

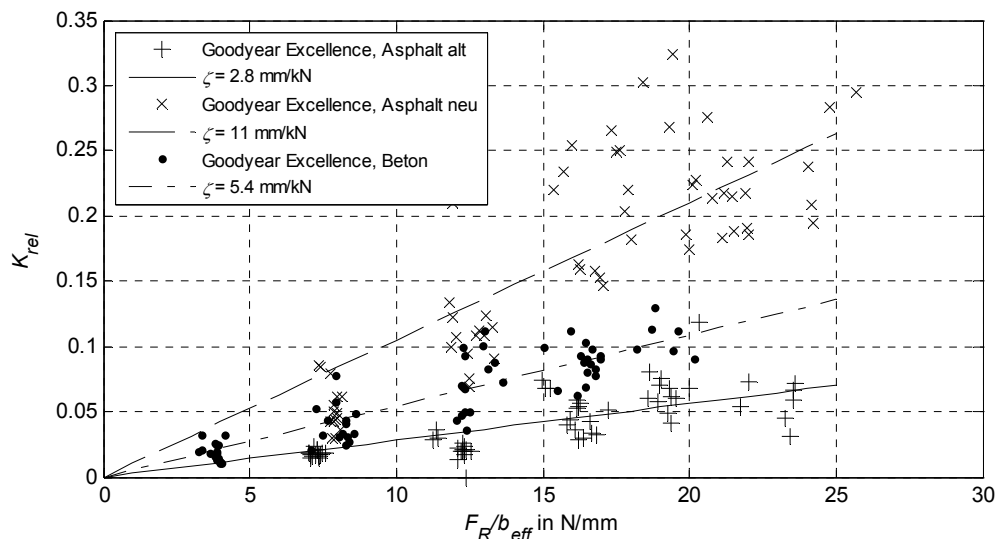


Abbildung 5.30: Relativer Kontrast über der breitenbezogenen Reibkraft für den Goodyear Excellence und drei verschiedene Fahrbahnen.

5.2.4 Zwischenfazit

Die Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass mit zunehmender Normalkraft die Verschleißhöhe ansteigt. Da die Versuche unter Variation der Normalkraft und Gleitgeschwindigkeit in der Regel mit demselben Profilausschnitt eines Reifens, also konstanter Kontaktfläche, durchgeführt wurden, nimmt dabei auch die Flächenpressung zu. In der Literatur wird davon ausgegangen, dass ein überproportionaler Zusammenhang zwischen Verschleißhöhe und Flächenpressung besteht. Zwar hat die Näherung der Messwerte mit einer Potenzfunktion Bestimmtheitsmaße zwischen 90 % und 96 % gezeigt, allerdings betragen die Bestimmtheitsmaße bei linearer Näherung auch zwischen 78 % und 85 %. Innerhalb der gegebenen Streuweite kann die Verschleißrate somit für den untersuchten Variationsbereich vereinfachend als konstant angenommen werden. Eine deutliche Steigerung des Verschleißes zeigt sich allerdings bei konstanter Normalkraft und gleichzeitiger Erhöhung der Flächenpressung. Deutliche Unterschiede außerhalb der Streuweite der Verschleißwerte haben sich dabei bei einer Verdoppelung der Flächenpressungen von 400 kPa auf 800 kPa gezeigt. Da die mittlere Flächenpressung im Latsch der Versuchsreifen bei einem Reifeninnendruck von 2,5 bar Werte um die 450 kPa zeigt, scheint der Einfluss der Flächenpressung unter der Annahme einer homogenen Flächenpressungsverteilung im Latsch und im zulässigen Belastungsbereich des Reifens allerdings vernachlässigbar.

Bezüglich des Einflusses der Reibgeschwindigkeit auf die Verschleißhöhe zeigt sich im Variationsbereich kein eindeutiger Zusammenhang, der sich nicht auch durch die Streuung der Werte aufgrund des Messfehlers erklären lässt. Der Einfluss der Gleitgeschwindigkeit und eines damit verbundenen Temperaturanstiegs in der Kontaktzone ist daher in dem untersuchten Variationsbereich nicht eindeutig nachzuweisen. Die Annahme, dass thermisch induzierter Verschleiß bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten vernachlässigbar ist, hat sich damit im Variationsbereich der Gleitgeschwindigkeit bis 3 m/s bewährt.

Ein möglicher Grund für die Streuung der Verschleißwerte um bis zu 2,4 mg/mm² liegt darin, dass der Masseverlust nach einer Messung mit VERINA im Verhältnis zur Masse des Profilausschnitts sehr klein ist und daher der relative Fehler bei der Messung entsprechend hoch. Zudem konnte während der Messungen ein verstärkter Verschleiß an der Einlauf- beziehungsweise Lippenbildung an der Auslaufkante des Profilelements festgestellt werden (vgl. Abbildung 5.31). Dieses Phänomen wird beispielsweise auch von Moldenhauer¹⁷² bei Untersuchungen an Reifenprofilblöcken beschrieben. Durch das Abreißen der ausgebildeten Lippen in unregelmäßigen Abständen bei den Versuchen sind Ausreißer des Masseverlustes in Richtung höherer Werte zu erklären.

¹⁷² Moldenhauer: Modellierung und Simulation der Dynamik und des Kontakts von Reifenprofilblöcken, 2010, S. 97

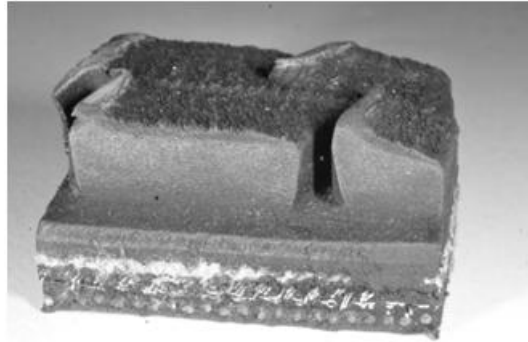


Abbildung 5.31: Verstärkter Verschleiß an der Einlaufkante und Lippenbildung an den Lamellen und der Auslaufkante der Profilausschnitte.

Auf identischer Fahrbahn unterschieden sich die Verschleißhöhen der vier getesteten Reifen untereinander deutlich weniger als bei Variation der Fahrbahnoberfläche und identischem Reifen. Der alte Asphalt, dessen Mikro- und Makrorauigkeit als höchste der drei Fahrbahnen angenommen werden kann, zeigt eine bis zu achtmal höhere Verschleißrate als der neue Asphalt und die Betonoberfläche. Letztere zeigt bei allen Reifen die geringste Verschleißrate, was sich durch die im Vergleich zu den beiden anderen Fahrbahnen glatte Oberflächenstruktur begründen lässt. Dies bestätigt die Annahme, dass eine höhere Feinrauigkeit der Fahrbahn auch zu einem höheren Verschleiß führt.

Bei der Schwärzungsrate zeigen die Ergebnisse auf identischer Fahrbahn grundsätzlich eine Zunahme des Kontrastwertes der Spur bei zunehmender Verschleißhöhe, wie im Modell angenommen. Die Annahme, dass die Sichtbarkeit, definiert als Kontrast zur Fahrbahn, alleine von der Verschleißhöhe abhängt, wurde jedoch klar falsifiziert. Bei Variation der Fahrbahn zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen der Schwärzungsrate auf dem alten Asphalt und den Schwärzungsraten auf den beiden anderen Fahrbahnen. Die Zunahme des Spurkontrastes auf dem neuen Asphalt und der Betonoberfläche ist bis zu zehnmal höher als auf dem alten Asphalt. Da nach der entwickelten Modellvorstellung der Kontrast nicht nur von der Färbung und der Konzentration des Reifenabriebs, sondern auch von der Helligkeit der Fahrbahn abhängt, zeigt der im Vergleich zu den anderen Fahrbahnen deutlich hellere Beton höhere Kontrastwerte als der dunklere alte Asphalt. Dies bestätigt die Aussage von Ahlgrimm et al.¹⁷³, dass der Kontrast schwacher Spuren auf Beton im Vergleich zu Asphalt höher ist. Im Widerspruch dazu steht jedoch, dass auch der neue Asphalt, als dunkelste Fahrbahn von den dreien, ähnliche hohe Kontrastwerte wie der Beton zeigt. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass die Schwärzung der Reifenspur auf dem neuen Asphalt, wie in der Literatur beschrieben, durch eine Reaktion mit dem Bitumen in der neuen Fahrbahn verstärkt wird. Dadurch ist die Spur deutlich schwärzer als auf den anderen beiden Fahrbahnen und der Kontrast somit ähnlich hoch wie auf dem Beton. Falls dies der Fall ist, scheint eine thermisch induzierte Reaktion bei Überschreiten einer bestimmten Grenztempera-

¹⁷³ Ahlgrimm et al.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 1, 1997, S. 70

tur allerdings unwahrscheinlich, da auch auf dem neuen Asphalt ein annähernd proportionaler Anstieg des Spurkontrastes mit der Reibkraft stattfindet, ohne dass es bei einer bestimmten Reibleistung zu einem Sprung kommen würde und zum anderen, da bei den Versuchen mit VERINA die gemessenen Temperaturerhöhungen an der Einlaufkante der Profilelemente bei der kurzen Reibdauer maximal 5 °C betragen und somit kaum über der Ausgangstemperatur der Fahrbahn von bis zu 40 °C an warmen Versuchstagen liegen. Stichversuche mit einem Heißluftfön haben erkennbare Verfärbungen des neuen Asphalts aufgrund thermischer Belastung erst ab Temperaturen von 85 °C oder höher gezeigt. Möglicherweise kommt es aber auch nur an den Kontaktstellen zwischen Gummi und Fahrbahn aufgrund der lokal im Verhältnis zum Mittelwert sehr viel höheren Flächenpressungen zu Temperaturspitzen, den sogenannten „Flashtemperaturen“, die nach Persson¹⁷⁴ bereits ab Gleitgeschwindigkeiten von 10 mm/s auftreten und mehr als doppelt so hoch wie die Durchschnittstemperaturen des Gummiblocks sein können. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Gummis lassen sich diese aber schon wenige Millimeter entfernt nicht mehr messen. Eine andere Erklärung, ohne die Beteiligung von Bitumen, könnte die Form und Anordnung des Abriebs aufgrund der Oberflächentopographie sein. Bei einer Fahrbahn mit hoher Makrorauigkeit und Profiltiefe konzentrieren sich die Abriebpartikel möglicherweise stärker an den einzelnen Rauigkeitsspitzen, was in Analogie zum Rasterdruckverfahren zu einer geringeren Anzahl dunklerer Punkte je Rasterzelle führt, während bei einer geringeren Makrorauigkeit und Profiltiefe des Asphalts der Abrieb sehr viel gleichmäßiger über die Fläche verteilt ist und dadurch auch bei gleicher Verschleißmenge je Einheitsfläche zu einem höheren Kontrast führt.

Bei Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Spurkontrast und breitenbezogener Reibkraft in Form der Spurzeichnungssensitivität zeigt sich eine absolute Streuung der Kontrastwerte um bis zu $1,5 \cdot 10^{-2}$ um den Mittelwert. Da die breitenbezogene Reibkraft relativ genau in einem Bereich von ± 1 N/mm messbar ist und die Wiederholgenauigkeit bei der Kontrastbestimmung unter annähernd konstanten Lichtverhältnissen maximale Abweichungen von $5 \cdot 10^{-3}$ gezeigt hat, wird angenommen, dass die Streuung der Kontrastwerte auf Inhomogenitäten (Streuung der Grauwerte innerhalb der Fahrbahn) und Fehlstellen auf der Fahrbahn (zum Beispiel Dreck oder Asphaltflechte) beziehungsweise in der Spur (zum Beispiel durch hellere Kratzspuren aufgrund mit geschliffener Steinen), wie in Abbildung 5.32 dargestellt, zurückzuführen ist.

¹⁷⁴ Persson: Rubber friction: role of the flash temperature, 2006

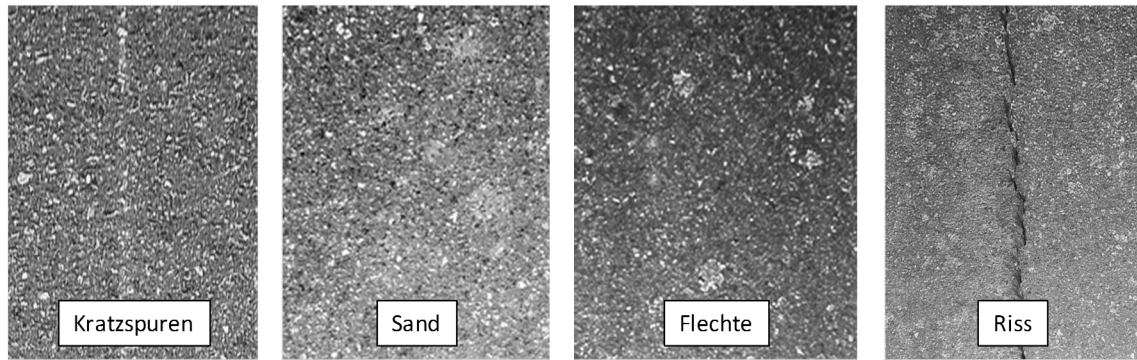


Abbildung 5.32: Beispiele für Störstellen/Inhomogenitäten auf der Fahrbahn.

Innerhalb dieses Streubereichs zeigen die Ergebnisse zwischen den Reifen auf identischer Fahrbahn einen geringeren Unterschied in der Spurzeichnungssensitivität als bei Variation der Fahrbahn. Dabei ist die Spurzeichnungssensitivität auf dem neuen Asphalt am größten und etwa doppelt so hoch wie die Sensitivität der Reifen auf Beton. Die Sensitivität auf dem alten Asphalt ist trotz höchster Verschleißrate am geringsten. Bezüglich der Spurzeichnungssensitivität wird die hohe Verschleißrate auf dem alten Asphalt durch die niedrige Schwärzungsrate kompensiert und vice versa zeigt die Betonfahrbahn trotz niedrigster Verschleißrate aufgrund der deutlich höheren Schwärzungsrate eine höhere Spurzeichnungssensitivität. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.33 dargestellt, in der die Schwärzungsrate über der Verschleißrate der Reifen auf den verschiedenen Fahrbahnen doppelt logarithmisch aufgetragen ist.

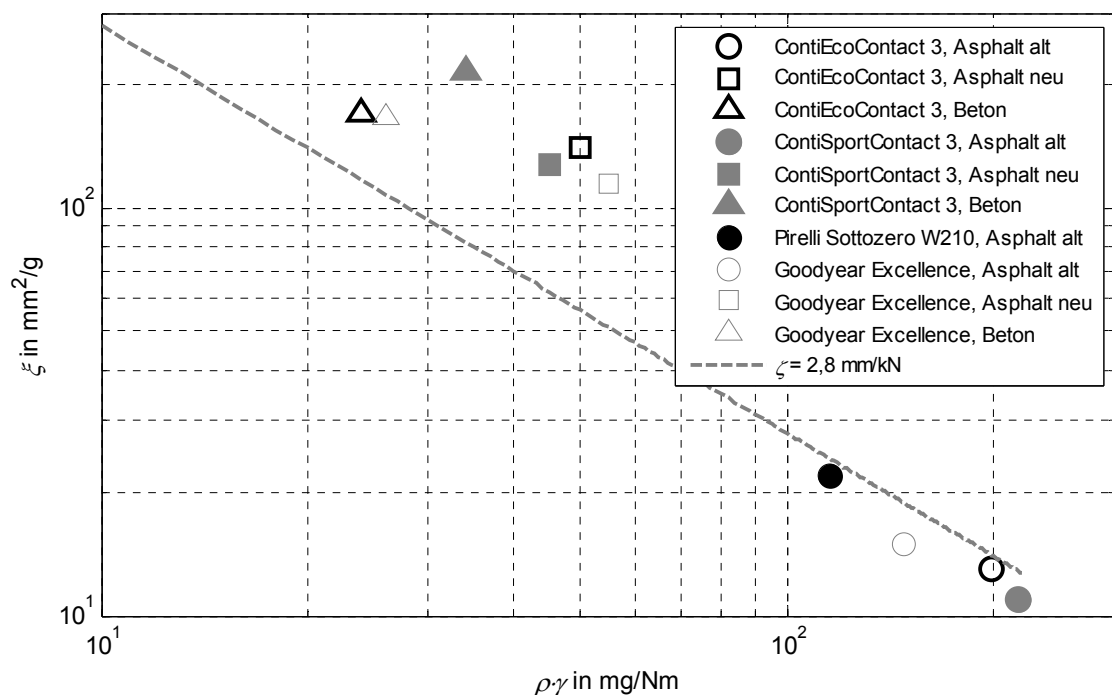


Abbildung 5.33: Schwärzungs- über Verschleißrate und Gerade konstanter Spurzeichnungssensitivität.

Da sich die Spurzeichnungssensitivität per Definition als Produkt aus Schwärzungs- und Verschleißrate ergibt, liegen Reifen-Fahrbahnkombinationen gleicher Spurzeichnungssensitivität bei doppelt logarithmischer Darstellung auf einer Geraden. Aus dieser Darstellung geht deutlich hervor, dass die Schwärzungsrate von der Verschleißrate unabhängig ist und dass sich Unterschiede in der Verschleißrate umso geringer auf die Höhe der Spurzeichnungssensitivität auswirken, je kleiner die Schwärzungsrate der Reifen-Fahrbahn-Kombination ist

5.3 Fahrdynamische Einflussgrößen

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse beruhen im Wesentlichen auf zwei Versuchsreihen:

Versuchsreihe 3.1: Zur Untersuchung des Einflusses der als relevant identifizierten Größen Längsschlupf und Schräglaufwinkel auf die Intensität der Reifenspur, wurden diese unabhängig voneinander variiert. Der Variationsbereich des Längsschlupf betrug dabei 2 % bis 20 % und der Variationsbereich des Schräglaufwinkels $\pm 8^\circ$. Für die Versuche mit PETRA stand nur der alte Asphalt zur Verfügung. Zur Berücksichtigung verschiedener Reifeneigenschaften, insbesondere der unterschiedlichen Reifensteifigkeiten, welche die Höhe der Reibkraft bei einem bestimmten Quer- oder Längsschlupf bestimmen, wurden die Versuche für alle vier Reifen durchgeführt. Die Bestimmung der Sichtbarkeitsgrenze erfolgte subjektiv. Die Kontrastwerte der Spuren wurden objektiv bestimmt.

Versuchsreihe 3.2: Zur Untersuchung der grundsätzlichen Übertragbarkeit der Intensitäten von Spuren, die mit gleitenden Profilblöcken erzeugt wurden, auf Spuren eines schlüpfenden Reifens, wurde bei PETRA die Reibkraft über die Änderung des Längsschlupfs bei niedrigen (5 % bis 12 %) und hohen (22 % bis 40 %) Werten variiert und die Intensität der resultierenden Spuren mit denen von VERINA verglichen. Dort erfolgte die Variation der Reibkraft über die Normalkraft bei einer dem Gleitschlupf korrespondierenden Gleitgeschwindigkeit. Die Versuche wurden mit dem ContiSportContact 3 und dem Pirelli Sottozero W210 durchgeführt, da sich diese am stärksten in ihrer Längssteifigkeit und in Bezug auf ihre Mischungseigenschaften unterscheiden. Die Bestimmung der Kontrastwerte erfolgte objektiv.

Eine Übersicht der durchgeführten Versuche und den entsprechenden Abbildungen ist in Tabelle 5.4 dargestellt.

Tabelle 5.4: Übersicht der durchgeführten Versuche zu fahrdynamischen Einflussgrößen.

Versuchsreihe	Variationsgröße	Reifen	Versuchswerkzeug	Darstellung
3.1	λ_x, α	CS	PETRA	Abbildung 5.34, Abbildung 5.35, Abbildung 5.36, Abbildung 5.37, Abbildung A.14
		CE		Abbildung 5.34, Abbildung 5.35, Abbildung 5.36, Abbildung 5.37, Abbildung A.13
		GE		Abbildung 5.34, Abbildung 5.35, Abbildung 5.36, Abbildung 5.37, Abbildung A.12
		PS		Abbildung 5.34, Abbildung 5.35, Abbildung 5.36, Abbildung 5.38, Abbildung 5.37
3.2	λ_x	CS	PETRA	Abbildung 5.39, Abbildung 5.40
	F_z, v		VERINA	Abbildung 5.40
	λ_x	PS	PETRA	Abbildung 5.39, Abbildung 5.41
	F_z, v		VERINA	Abbildung 5.41

5.3.1 Längsschlupf und Schräglaufwinkel

Abbildung 5.34 zeigt die nach Gleichung (4.3) aus den μ -Schlupf-Messungen der vier Reifen auf dem alten Asphalt mit PETRA berechneten Verläufe der breitenbezogenen Reibkraft über dem Längs- (mit $\alpha_{soll} = 0^\circ$) und Querschlupf (mit $\lambda_{x,soll} = 0\%$). Die Verläufe unter Querschlupf sind bis ca. 13 % Schlupf dargestellt, da dies dem maximalen Schräglaufwinkelbereich von PETRA ($\alpha_{max} = \pm 8^\circ$) entspricht. Die Umrechnung zwischen Schräglaufwinkel und Querschlupf erfolgt nach Gleichung (3.11) unter Berücksichtigung der Längs- und Quersteifigkeit des jeweiligen Reifens. Die effektive Breite wurde für jeden Reifen aus den Footprintmessungen in Abhängigkeit der mittleren Radlast ermittelt und entspricht nach der Modellvorstellung bei reinem Längsschlupf der Latschbreite und bei reinem Querschlupf der Latschhöhe, abzüglich des Negativanteils (vgl. Kapitel 3.3 und 4.3.3). Es ist zu erkennen, dass die drei Sommerreifen unter Längsschlupf etwa die gleichen Reibkraftverläufe zeigen. Bei dem Winterreifen (Pirelli Sottozero W210) ist der Anstieg der Reibkraft aufgrund der geringeren Längssteifigkeit und der höchsten effektiven Breite deutlich niedriger. Unter Querschlupf ist der Anstieg der breitenbezogenen Reibkraft über dem Schlupf bei dem Winterreifen am höchsten. Obwohl er die zweitniedrigste Quersteifigkeit besitzt, ist die Latschhöhe und damit die effektive Breite unter reinem Querschlupf von den vier Reifen am geringsten. Der ContiEcoContact 3 zeigt hier den kleinsten Anstieg, da der Latsch aufgrund der kleineren Reifenbreite (185 mm) bei identischer Radlast im Vergleich zu den anderen Reifen (225 mm) schmaler und länger ist und er daher unter reinem Querschlupf die größte effektive Reibbreite besitzt. Aufgrund des Deformationsschlupfes ist die Reibkraft bei

allen Reifen bis etwa 2 % Schlupf Null. Nach der Modellvorstellung bedeutet dies, dass keine Reibspuren unter 2 % Längs- und Querschlupf beziehungsweise 1,15° Schräglaufwinkel entstehen können.

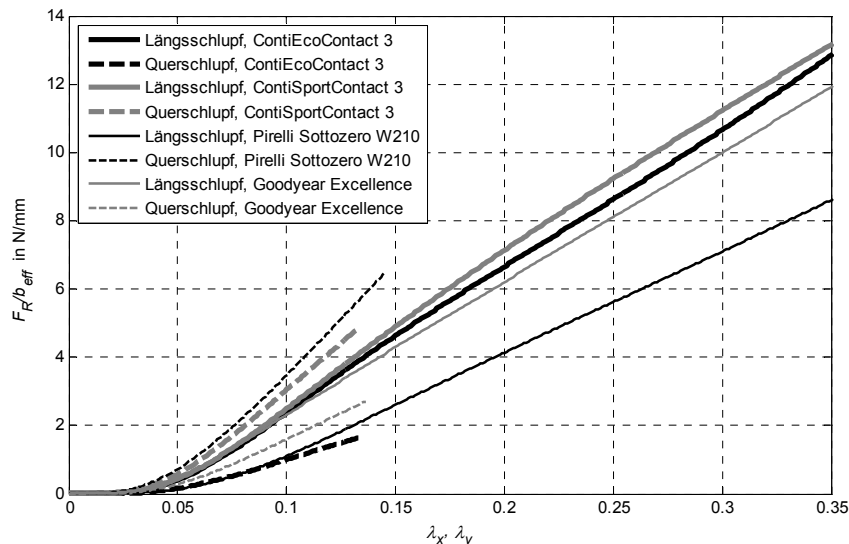


Abbildung 5.34: Breitenbezogene Reibkraft in Abhängigkeit des Quer- und Längsschlupfes bei konstanter Radlast für vier Reifen.

Da der Sichtbarkeitsfaktor unter den Aufnahmebedingungen im Fotozelt geringer als unter subjektiv optimalen Sichtbedingungen ist (vgl. Kapitel 5.1.3), wurden die Schlupfwerte an der Sichtbarkeitsgrenze subjektiv bestimmt. Abbildung 5.35 zeigt die Reib- und Längsschlupfwerte und Abbildung 5.36 die Reibwerte und Schräglaufwinkel unter denen sichtbare Reifenspuren mit den vier Reifen und PETRA auf dem alten Asphalt erzeugt wurden. Die Fahrzeuggeschwindigkeit betrug konstant 30 km/h und die statische Radlast zwischen 4,5 und 4,7 kN. Als sichtbar werden nur Spuren eingestuft, die eindeutig von mindestens zwei Versuchsbetreuern erkannt und deren Erkennbarkeit durch Spurfragmente (zum Beispiel Kanten der Umfangsprofilierung) unterstützt werden. Dies entspricht einer Intensität von 20 % und mehr nach der Intensitätsskala von Grandel¹⁷⁵. In Abbildung 5.35 ist zu erkennen, dass sichtbare Reifenspuren ab ca. 2 % beziehungsweise 4 % Längsschlupf bei den Sommerreifen und etwa 9 % Längsschlupf bei dem Winterreifen erkannt wurden. Im Falle des ContiEcoContact 3 beträgt der Reibwert an der Sichtbarkeitsgrenze mit 0,5 etwa die Hälfte des maximalen Reibwerts.

¹⁷⁵ vgl. Kapitel 2.1.3

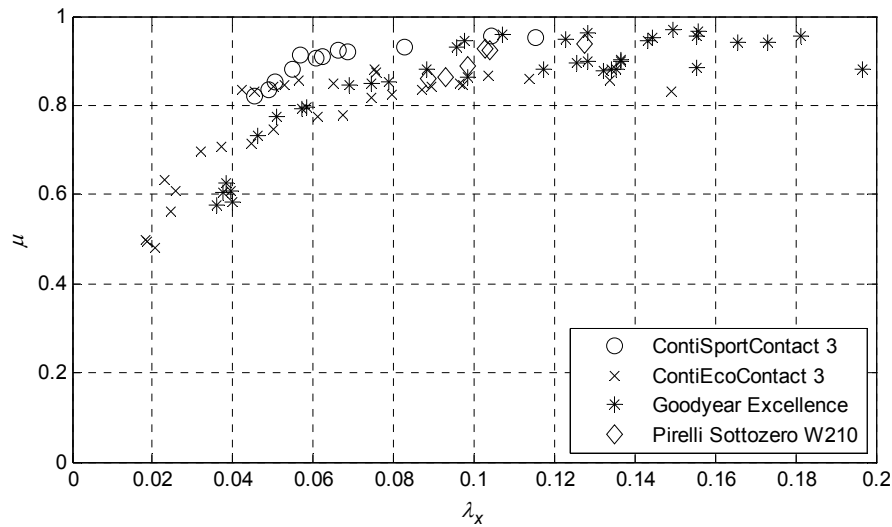


Abbildung 5.35: Reib- und Längsschlupfwerte der vier Reifen bei sichtbaren Reifenspuren.

In Abbildung 5.36 ist zu erkennen, dass bei dem ContiEcoContact 3 sichtbare Reifenspuren ab $+1,5^\circ$ beobachtet wurden. Bei dem Winterreifen liegt die Sichtbarkeitsgrenze mit 6° Schräglaufwinkel deutlich höher.

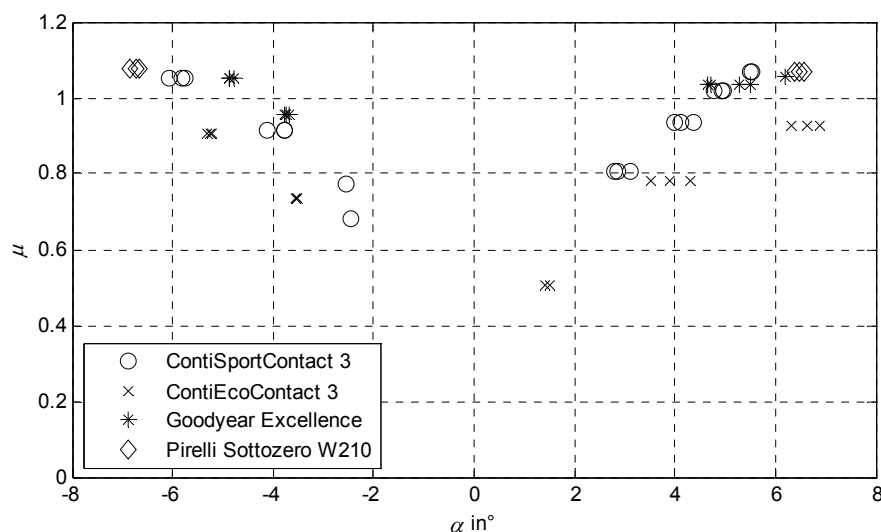


Abbildung 5.36: Reibwerte und Schräglaufwinkel der vier Reifen bei sichtbaren Reifenspuren.

Abbildung 5.37 zeigt den Vergleich der minimalen Reibwerte an der Sichtbarkeitsgrenze zwischen Längs- und Querschleupf. Zu Vergleichszwecken sind ebenfalls die maximalen Reibwerte der jeweiligen Reifen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der ContiEcoContact 3 den niedrigsten Reibwert an der Sichtbarkeitsgrenze zeigt, der unter Längs- und Querschleupf etwa gleich groß ist. Bei den drei anderen Reifen zeigen sich deutliche Unterschiede in Bezug auf die Schleupfrichtung. Die Reibwerte des Pirelli Sottozero an der Sichtbarkeitsgrenze sind in beiden Schleupfrichtungen am höchsten und entsprechen annähernd den maximalen Reibwerten. Den größten Unterschied zwischen den Schleupfrichtungen zeigt der Goodyear Excellence, bei dem der Reibwert unter Längsschleupf deutlich niedriger als unter Querschleupf ist. Aus dieser Darstellung geht

klar hervor, dass Reifenspuren auch deutlich unterhalb des maximalen Reibwerts entstehen können.

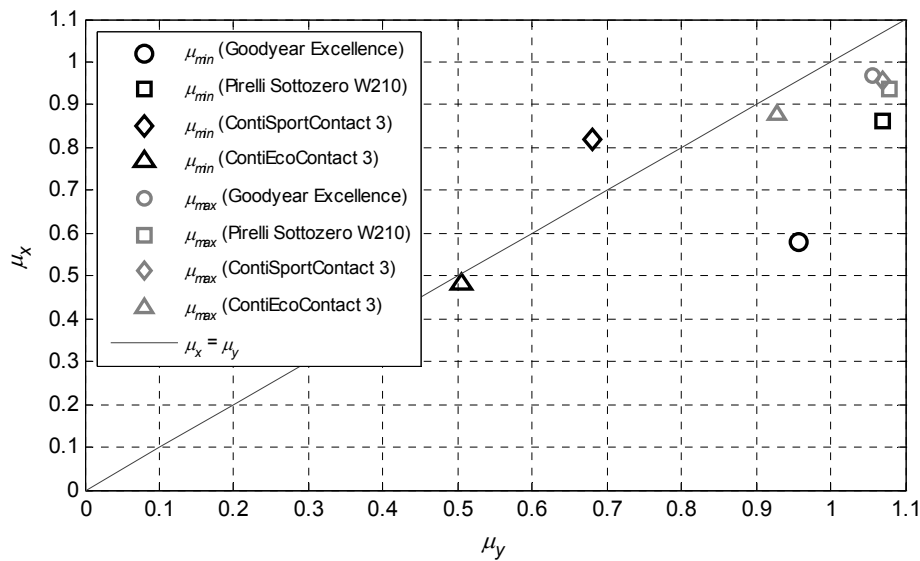


Abbildung 5.37: Minimale Reibwerte unter Längs- und Querschlupf der vier Reifen an der Sichtbarkeitsgrenze.

In Abbildung 5.38 ist beispielhaft der objektiv ermittelte Kontrast der Spuren des Pirelli Sottozero auf dem alten Asphalt unter Variation des Längsschlupfs und Variation des Querschlupfs zwischen 7 % und 17 % dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Kontrastwerte in einem Bereich von $\pm 0,005$ um 0,01 streuen. Da die Spuren subjektiv auf den Fotos im Fotozelt nicht oder nur sehr schwach zu erkennen waren, ist davon auszugehen, dass die von dem Algorithmus gefundenen Minima in Längsrichtung auf dunklere, nicht von der Reibspur stammende Stellen auf der Fahrbahn zurückgehen, da die Standardabweichung der Kontrastwerte auf der Fahrbahn ohne Spur im Mittel über sämtliche Bilder etwa 0,015 (in einem Bereich zwischen 0,012 und 0,017) beträgt.

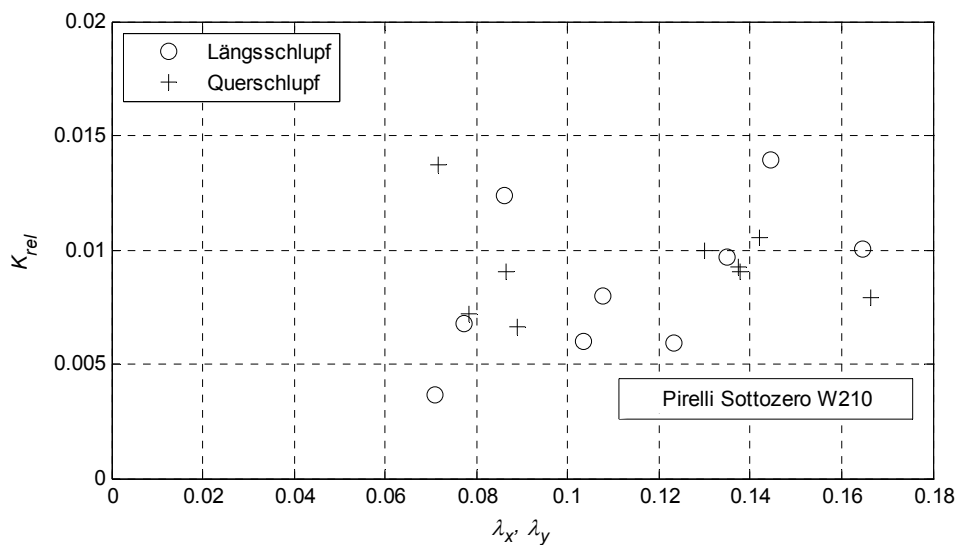


Abbildung 5.38: Spurkontrast der Spuren des Pirelli Sottozero W210 bei (separater) Variation von Längs- und Querschlupf.

In dem dargestellten Schlupfbereich lässt sich aufgrund des Sichtbarkeitsfaktors unter den Aufnahmebedingungen bei keinem der Reifen¹⁷⁶ ein proportionaler Zusammenhang zwischen Schlupf und Höhe des Kontrasts der Spuren feststellen. Die Multiplikation der berechneten breitenbezogenen Reibkraft (zwischen 0,4 und 8 N/mm, vgl. Abbildung 5.34) bei einem Längs- und Querschlupf zwischen 7 % und 17 % und der mit VERINA bestimmten Spurzeichnungssensitivität von $\zeta = 0,9 \text{ mm/kN}$ ergibt einen Kontrastwertebereich zwischen $3,6 \cdot 10^{-4}$ und $7,2 \cdot 10^{-3}$, der unterhalb der Standardabweichung von $1,5 \cdot 10^{-2}$ liegt und der Modellvorhersage im gegebenen Streubereich entspricht.

Da der Querschlupfvariationsbereich durch den maximalen Schräglaufwinkel begrenzt ist, war eine weitere Erhöhung der Reibkraft nur über den Längsschlupf möglich. In Abbildung 5.39 sind die Kontrastwerte von jeweils drei Spuren mit zwei unterschiedlichen Reifen bei niedrigem und hohem Schlupf dargestellt. Im Vergleich dazu ist die Modellfunktion für die beiden Reifen dargestellt, die den Kontrastverlauf über dem Schlupf aus der Multiplikation der Reibkraft-Schlupf-Kurve mit der experimentell mit VERINA bestimmten Spurzeichnungssensitivität ζ der beiden Reifen auf dem alten Asphalt zeigt. Es ist zu erkennen, dass die Kontrastwerte mit zunehmendem Schlupf ebenfalls zunehmen. Innerhalb des auf die Inhomogenität der Fahrbahn zurückzuführenden Streubereichs von $\pm 0,015$ liegen die gemessenen Kontrastwerte bei dem ContiSportContact 3 bei allen sechs Spuren und bei dem Pirelli Sottozero bei fünf von sechs Spuren (außer bei 22 % Schlupf) im Bereich des durch die Modellfunktion berechneten Wertes.

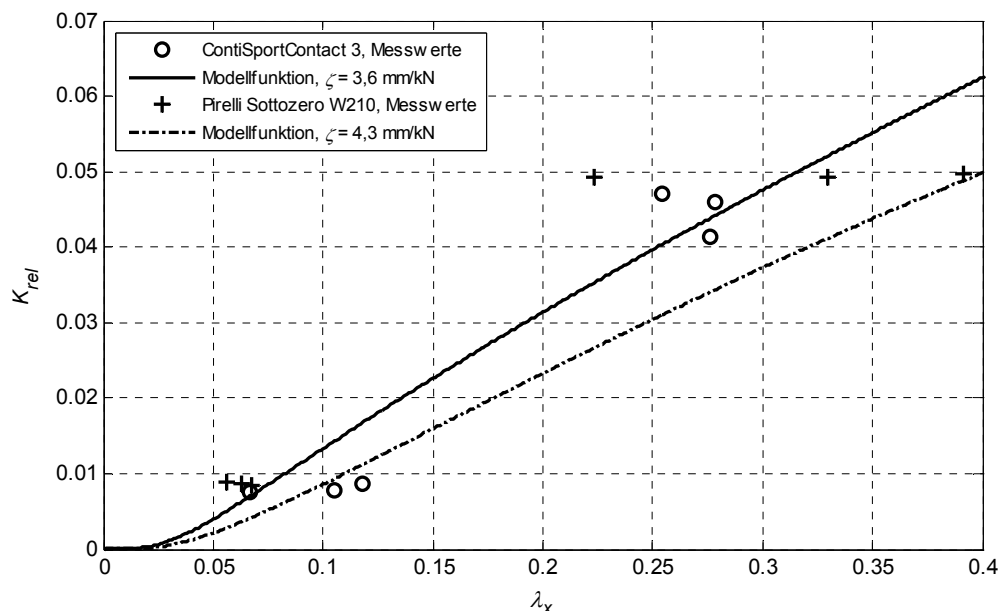


Abbildung 5.39: Gemessene Kontrastwerte bei niedrigen und hohen Schlupfwerten zweier Reifen im Vergleich mit der Modellfunktion (Sensitivitätswerte aus VERINA-Messung).

¹⁷⁶ siehe Anhang A.2.1

5.3.2 Übertragbarkeit von VERINA- auf PETRA-Messungen

In Abbildung 5.40 ist der Kontrast der erzeugten Spuren mit PETRA und VERINA über der breitenbezogenen Reibkraft für den ContiSportContact 3 und in Abbildung 5.41 für den Pirelli Sottozero W210 dargestellt. Die Intensitätswerte der Spuren von VERINA sind mit einer linearen Regressionsgerade angenähert. Die breitenbezogene Reibkraft bei PETRA wird dabei aus der gemessenen Umfangskraft und dem Längsschlupf am Reifen mit der vorher bestimmten Längssteifigkeit und der effektiven Breite aus den Footprintmessungen berechnet. Die Reibkraft bei VERINA entspricht der gemessenen Längskraft am Profilelementhalter.

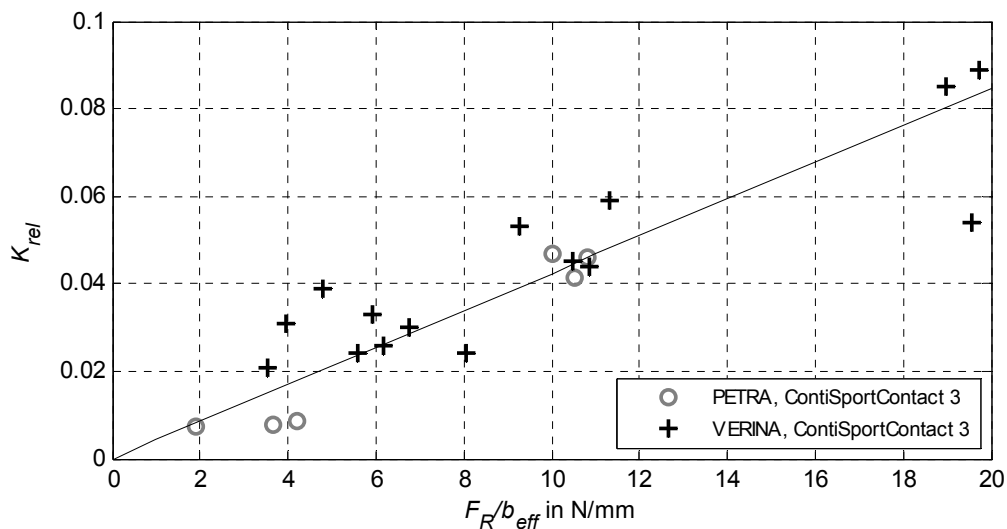


Abbildung 5.40: Spurkontrast über breitenbezogener Reibkraft von Spuren mit PETRA und VERINA, ContiSportContact 3.

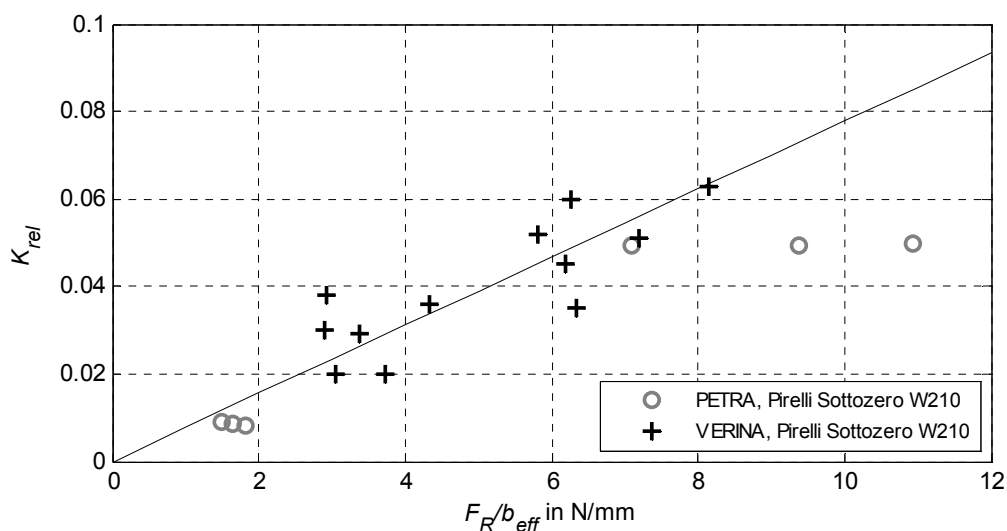


Abbildung 5.41: Spurkontrast über breitenbezogener Reibkraft von Spuren mit PETRA und VERINA, Pirelli Sottozero W210

Es ist zu erkennen, dass die Spuren von PETRA und VERINA bei gleicher breitenbezogener Reibkraft innerhalb des Streubereichs bei beiden Reifen etwa gleich hohe Kontrastwerte zeigen, beziehungsweise dass sich die Intensitäten der PETRA-Spuren mit der Regressionsgeraden durch die Intensitäten der VERINA-Spuren annähern lassen. Bei dem Pirelli Sottozero zeigt sich allerdings eine über den Streubereich hinausgehende untere Abweichung der Intensitäten bei ca. 9,4 N/mm und 11 N/mm.

In Abbildung 5.42 sind die Reibwerte über der breitenbezogenen Reibkraft dargestellt, die zu den in Abbildung 5.40 und Abbildung 5.41 dargestellten Kontrastwerte korrespondieren. Es ist zu erkennen, dass die Reibwerte des Pirelli Sottozero sowohl bei den PETRA- als auch bei den VERINA-Messungen niedriger als die Reibwerte des ContiSportContact 3 sind. Bei dem gleichen Reifen treten Reibwertunterschiede zwischen VERINA und PETRA von maximal 0,2 auf. Dabei sind die Reibwerte der Messungen mit VERINA tendenziell etwas niedriger als die Reibwerte aus den Messungen mit PETRA. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass in der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche bei VERINA vollständig Gleitreibung vorliegt, während bei dem schlüpfenden Reifen bei PETRA ein Teil des Latsches noch haftet.

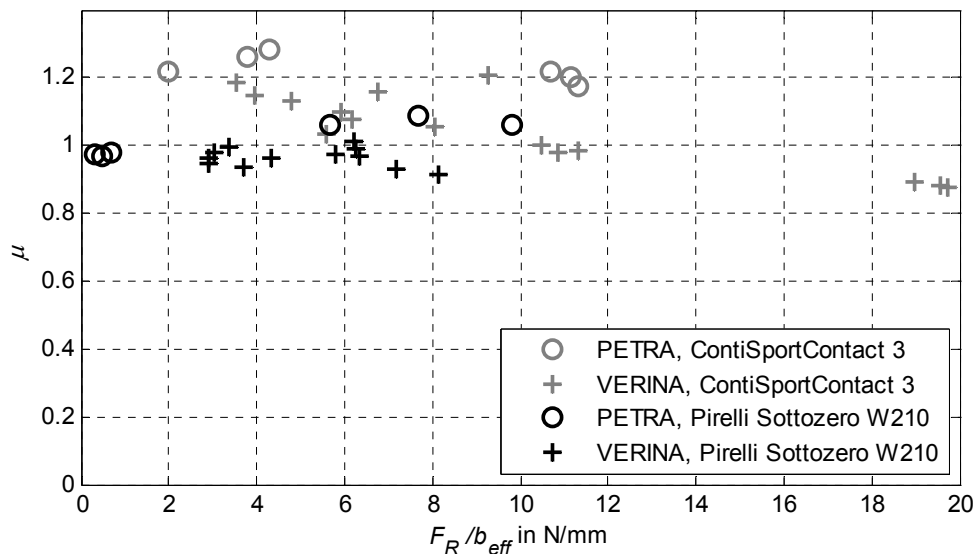


Abbildung 5.42: Vergleich der gemessenen Reibwerte zwischen PETRA und VERINA bei identischer breitenbezogener Reibkraft.

5.3.3 Zwischenfazit

Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Untersuchungen mit VERINA auf Messungen mit PETRA zeigen sich innerhalb der Streuweite der Kontrast- und Schlupfwerte bei der gleichen breitenbezogenen Reibkraft vergleichbare Kontrastwerte. Dies stützt die Hypothese, dass der Betrag der Reibarbeit, bezogen auf den zurückgelegten Weg, den Einfluss der fahrdynamischen Größen beschreibt. Im Vergleich zu VERINA, wo sowohl die streckenbezogene Reibarbeit als Kraft in Reibrichtung sowie die Reibbreite als Breite des Profilblocks relativ genau gemessen werden, ist die Bestimmung der strecken- und

breitenbezogenen Reibarbeit bei PETRA als Produkt aus resultierender Umfangskraft und resultierendem Gleitschlupf deutlich höheren Fehlereinflüssen unterlegen. Dies liegt zum einen daran, dass der Gleitschlupf nicht direkt gemessen, sondern aus den mittleren Reifensteifigkeiten und dem Schlupf an der Felge berechnet wird, und zum anderen, dass die effektive Reibbreite nur aus statischen Footprintmessungen geschätzt und nicht in Abhängigkeit der tatsächlichen Latschverformung gemessen werden kann.

Eine Überprüfung des nach dem Modell vorhergesagten Zusammenhangs zwischen Spurkontrast und breitenbezogener Reibkraft ist nur innerhalb des auf den Streubereichs der Kontrastwerte von $\Delta K_{rel} = 1,5 \cdot 10^{-2}$ zurückzuführenden Toleranzbereiches möglich. Dieser nimmt bei der Rückrechnung der breitenbezogenen Reibkraft mit steigender Spurzeichnungssensitivität nach Gleichung (5.1) ab.

$$\Delta \frac{F_R}{b_{eff}} = \frac{\Delta K_{rel}}{\zeta} \quad (5.1)$$

Bei den auf dem alten Asphalt maximal ermittelten Sensitivitäten zwischen 3,6 und 4,3 mm/kN ergibt sich somit ein Unsicherheitsbereich von bis zu 4 N/mm. Bei den beiden untersuchten Reifen ergibt sich daraus ein Unsicherheitsbereich von etwa 10 % - 15 % Längsschlupf, bei Annahme konstanter Radlast und Schräglaufwinkel Null. Das heißt, dass der Schlupfbereich, der bei gleichen Kontrastwerten wie durch die Modellfunktion für einen bestimmten Schlupf berechnet, gemessen wird, zur Bewährung des Modells führt, wenn er innerhalb des Toleranzbereichs von maximal 15 % Schlupf von dem Rechenwert abweicht. Bei Variation des Längsschlupfes zwischen 5 und 40 % ist auch objektiv eine Zunahme der Kontrastwerte mit dem Schlupf festzustellen, die bis auf eine Ausnahme innerhalb des Streubereichs den berechneten Werten mit der aufgestellten Modellgleichung entspricht und damit Hypothese H 1.0 grundsätzlich bestätigt, dass der Spurkontrast bei konstanter Spurzeichnungssensitivität mit der breitenbezogenen Reibkraft zunimmt. Die Ausreißer bei den Spuren des Pirelli Sottozero im höheren Schlupfbereich lassen sich damit begründen, dass die Schlupfwerte, insbesondere im instabilen Bereich der μ -Schlupf-Kurve, Schwankungen von bis zu ± 10 % unterliegen und damit von dem gemittelten Wert im Auswertebereich abweichen können. Bei einer Spurzeichnungssensitivität von 11 mm/kN, wie sie maximal auf Beton gemessen wurde, ergibt sich ein Unsicherheitsbereich von nur 1,4 N/mm. Je nach Reibkraft-Schlupf-Kennlinie auf der Betonfahrbahn müssten die Werte dann innerhalb eines maximalen Unsicherheitsbereichs von ca. 5 % liegen. Falls sich das Modell auch noch in weiteren Untersuchungen bewährt, bedeutet dies im Umkehrschluss, dass bei der derzeitigen Streuung der Kontrastwerte die Genauigkeit des Simulationsergebnisses mit der effektiven Spurzeichnungssensitivität zunimmt. Dies kann entweder durch eine Erhöhung der tatsächlichen Spurzeichnungssensitivität (zum Beispiel Variation der Fahrbahn) oder des Sichtbarkeitsfaktors der Bildaufnahme erfolgen. In diesem Fall lassen sich möglicherweise auch die Unterschiede der verschiedenen Reifen bezüglich des Reibkraft-Schlupf-Verlaufs aufgrund der verschiedenen Steifigkeiten und maximaler Reibwerte feststellen, die bei den durchgeführten Versuchen und objektiver Kontrastbestimmung aufgrund der

geringen Spurzeichnungssensitivität nicht feststellbar waren. Bei subjektiver Sichtbarkeitsbewertung und höherem Sichtbarkeitsfaktor sind deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Reifen bezüglich der unteren Schlupf- und Reibwertgrenze bei Auftreten sichtbarer Reibspuren erkennbar. Diese bestätigen die Modellvorhersagen bezüglich der Höhe der Reibkraft in Abhängigkeit des Gleitschlupfanteils aufgrund unterschiedlicher Reifensteifigkeiten. Die Annahme, dass sichtbare Reifenspuren erst bei Erreichen des maximalen Reibwertes entstehen, wurde im Rahmen der durchgeführten Versuche klar falsifiziert.

5.4 Diskussion

Im Unterschied zu den aus der Literatur bekannten Untersuchungen, die sich mit der Intensität beziehungsweise Sichtbarkeit von Reifenspuren beschäftigen, wurde im Rahmen dieser Arbeit die Intensität als Kontrast zwischen Reifen und Fahrbahn objektiv bestimmt. Durch die Erzeugung reproduzierbarer Aufnahmebedingungen (konstante Kameraeinstellungen, Kameraposition, Belichtungsbedingungen) konnte bei wiederholter Bildaufnahme und Intensitätsbestimmung die Reliabilität der Intensitätsmessung nachgewiesen werden. Unter den Versuchsbedingungen wurde, wenn möglich, darauf geachtet, dass die Spuren nur auf Fahrbahnstellen ohne schon vorhandene sichtbare Spuren und andere Inhomogenitäten (zum Beispiel Fahrbahnmarkierungen, Risse, Flickstellen etc.) erzeugt beziehungsweise fotografiert wurden. Die Robustheit der Kontrastbestimmung bei Vorhandensein solcher Störstellen, beispielsweise bei der Bestimmung des Spurkontrasts am realen Unfallort, wurde nicht betrachtet. Inwiefern der Kontrast eine valide Kenngröße für die subjektiv empfundene Sichtbarkeit einer Reifenspur darstellt, konnte im Rahmen dieser Arbeit nur durch die Plausibilisierung der Ergebnisse mit dem Subjektivurteil weniger Individuen untersucht werden. Dabei haben sich bei höherer subjektiver Sichtbarkeit auch höhere Kontrastwerte gezeigt, so dass der Kontrast als valide Kenngröße für die Spurintensität angenommen wird. Zur Bestimmung der Sichtbarkeitsgrenzen hat sich das Verfahren nicht bewährt, da die in den Grenzen der technischen Realisierbarkeit gewählten Sichtbedingungen nicht den maximalen Sichtbarkeitsfaktor erreichen. Die aus diesem Grund auf der subjektiven Beurteilung des Vorhandenseins einer Reifenspur basierenden Ergebnisse sind daher hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit auf die jeweiligen Lichtverhältnisse beschränkt. Da nur solche Spuren gewertet wurden, die eindeutig von mehreren Versuchsbetreuern unter den gegebenen Lichtverhältnissen als sichtbar beurteilt wurden, kann die Bestimmung der Sichtbarkeitsgrenze als reliabel betrachtet werden. Die Ergebnisse sind daher geeignet, um universelle Hypothesen zu falsifizieren, die höhere Schlupf- und Reibwerte als die gemessenen Werte für die Entstehung von Reibspuren voraussetzen. Eine Verallgemeinerung, dass die Sichtbarkeitsgrenze immer bei den gemessenen Schlupf- und Reibwerten liegt, ist allerdings nicht zulässig.

Die Versuche mit PETRA und VERINA wurden für jeden Messpunkt unter Variation der Reihenfolge wiederholt. Die Werte haben sich im definierten Streubereich als reproduzierbar erweisen. Damit ist die Reliabilität der Untersuchungen sichergestellt. Die Messungen wurden bei trockener Witterung und Temperaturen über den Versuchszeitraum von ca. 10 °C bis ca. 30 °C durchgeführt. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf deutlich höhere oder niedrigere Temperaturen konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden. Ebenfalls gelten die getroffenen Aussagen zunächst nur für die untersuchten Reifen und Fahrbahnen. Für eine belastbare Aussage, inwiefern sich die Unterschiede, die zwischen den getesteten Reifen und Fahrbahnen beobachtet wurden, auf andere ähnliche Reifen- (zum Beispiel Winter- gegenüber Sommerreifen) und Fahrbahntypen (zum Beispiel Beton gegenüber Asphalt) verallgemeinern lassen, sind weitere Fahrbahn- und Reifenvariationen durchzuführen.

Die Validität der Messungen mit VERINA zur Übertragbarkeit auf einen schlüpfenden Reifen wurde für den Fall reinen Längsschlupfes überprüft. Bei identischer breitenbezogener Reibkraft haben sich ähnliche Kontrastwerte bei Spuren von PETRA und VERINA gezeigt. Die dabei gemessenen Reibwerte weichen bei identischem Reifen innerhalb eines Streubereichs um etwa 20 % voneinander ab. Dies liegt noch innerhalb der Streubereichs, der auch bei den Rohdaten einer μ -Schlupf Messung mit PETRA alleine zu beobachten ist¹⁷⁷. Die Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse mit VERINA auf einen Reifen unter Längsschlupf kann daher als valide angenommen werden. Bezüglich der Übertragbarkeit auf Querschlupf können keine belastbaren Aussagen getroffen werden. Da sich der Latsch unter Schräglauf im Vergleich zur statischen Belastung um die Hochachse nierenförmig verformt, ist davon auszugehen, dass der Fehler bei der Bestimmung der Reibbreite bei Vereinfachung des Latsches als Ellipse deutlich größer ist als unter Längsschlupf.

¹⁷⁷ vgl. Kapitel 4.3.3, Abbildung 4.20

6 Gesamtfazit und Ausblick

Bei der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen dienen sichtbare Reifenspuren, sofern vorhanden, als wichtige Anknüpfungstatsachen. Insbesondere Reibspuren auf befestigten Fahrbahnen, deren Entstehung auf die am Reifen wirkenden Umfangs- und Querkräfte zurückgeführt wird, werden als Indiz für das Überschreiten gewisser fahrdynamischer Grenzen gesehen. Sowohl bei der Rückwärtsrechnung auf Basis vorhandener Spuren als auch bei der Simulation eines Unfallhergangs wird üblicherweise die Annahme getroffen, dass Brems- oder Driftspuren an der Haftgrenze der Reifen entstehen. Im Widerspruch dazu werden in einigen Fällen sichtbare Reifenspuren schon bei deutlich geringerer Kraftschlussausnutzung oder keine sichtbaren Reifenspuren bei maximaler Kraftschlussausnutzung beobachtet. Daneben wird in der Literatur von einem Zusammenhang zwischen Radlast und Schlupf sowie der Intensität von Reifenspuren berichtet und von Unterschieden der Sichtbarkeitsgrenze bezüglich konstanter fahrdynamischer Parameter bei unterschiedlichen Reifen und Fahrbahnbelägen. Ziel der Arbeit ist die Klärung der Fragestellung, ob und unter welchen Bedingungen ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Auftreten und der Intensität von Reifenspuren und der Höhe bestimmter fahrdynamischer Größen besteht.

Unter der Annahme, dass schwach bis mäßig sichtbare Reibspuren hauptsächlich auf den mechanischen Verschleiß des Reifens zurückgehen und deren Intensität der Verschleißmenge pro Fläche proportional ist, wurde die Höhe der breitenbezogenen Reibkraft, die sich aus der resultierenden Umfangskraft und dem resultierenden Reifenschlupf berechnet, als wesentliche Einflussgröße identifiziert. Der Einfluss verschiedener Reifen und Fahrbahnen auf die Verschleißhöhe und Spurintensität wird dabei unter dem Begriff der Spurzeichnungssensitivität zusammengefasst.

Der zentrale Ansatz der Arbeit besteht in einer getrennten Untersuchung der möglichen Einflussfaktoren in fahrdynamisch relevante Größen, Reifen- und Fahrbahneigenschaften sowie sichtbarkeitsbeeinflussende Faktoren. Es wurde ein fotometrisches Verfahren bestehend aus Bildaufnahme- und Bildverarbeitung entwickelt, das erstmals eine objektive Bestimmung der als Kontrast zwischen Spur und Fahrbahn definierten Spurintensität ermöglicht. Bei der Bildaufnahme hat sich bestätigt, dass die Kontrastwerte stark mit der Kamera- und Lichtposition sowie der Belichtungsart variieren. Eine Aussage bezüglich des Zusammenhangs verschiedener Einflussfaktoren und der Intensität von Reifenspuren ist daher nur unter konstanten Sicht- und Lichtbedingungen zulässig.

Für die Untersuchung der Spurzeichnungssensitivität wurde ein linearer Reibprüfstand für Reifenprofilblöcke entwickelt, mit dem im Gegensatz zu Experimenten am schlüpfenden Rad die Messung und Kontrollierbarkeit der lokalen Reibkraft und -geschwindigkeit realisierbar ist. Zusammen mit dem fotometrischen Verfahren ermöglicht dies erstmals die objektive Untersuchung des Fahrbahnkontrasts in Abhängigkeit kontrollierter Reibparameter sowie der Verschleißmenge mit verschiedenen Reifenpro-

ben auf realen Fahrbahnen. Die Versuchsergebnisse haben die Hypothese falsifiziert, dass die Intensität einer Reifenspur alleine von der Verschleißhöhe abhängig ist. Ein solcher Zusammenhang hat sich nur auf identischer Fahrbahn gezeigt. Im Vergleich der drei getesteten Fahrbahnen haben sich bei gleicher Verschleißhöhe deutliche Unterschiede in der Intensität mit bis zu viermal höheren Werten ergeben. Im Falle des alten Asphalts und der Betonfahrbahn lassen sich die Ergebnisse mit der entwickelten Modellvorstellung plausibilisieren. Diese sagt vorher, dass bei gleicher Verschleißhöhe die Schwärzung der Spur etwa konstant ist und der Kontrast mit zunehmender Helligkeit der Fahrbahn zunimmt. Die hohen Kontrastwerte bei dem dunklen neuen Asphalt stehen dazu im Widerspruch, da offensichtlich bei konstanter Verschleißhöhe die Schwärzung der Spur im Vergleich zu den Spuren auf den anderen beiden Fahrbahnen höher ist. Dies stützt die in der Literatur zu findende Annahme, dass bei Fahrbahnen mit hoher Bitumenkonzentration in der Oberfläche eine fahrbahnseitige Verstärkung der Spurzeichnung stattfindet. Die Ergebnisse zeigen allerdings auch, dass dieser Effekt nicht das Erreichen besonders hoher Temperaturen voraussetzt und die Spurintensität wie auch bei den anderen Fahrbahnen mit der Reibkraft zunimmt. Die aufgestellte Hypothese, dass der Spurkontrast bei konstanter Reifen-Fahrbahn-Kombination mit der breitenbezogenen Reibkraft zunimmt, wurde im Rahmen der Versuche daher nicht falsifiziert.

Bei der Untersuchung der fahrdynamischen Einflussgrößen auf die Spurintensität durch gezielte Variation des Längs- und Querschlupfs mit einem Reifenmessenanhänger sind Differenzierungen innerhalb des Streubereichs der Kontrastwerte aufgrund der geringen Spurzeichnungssensitivität der Reifen auf der Standardfahrbahn unter den gewählten Sicht- und Lichtbedingungen bei Schlupfwerten bis 12 % nicht möglich gewesen. Bei starker Variation des Längsschlupfes um bis zu 40 % haben sich Unterschiede in der Spurintensität gezeigt, die mit der Intensität der Spuren der Profilblöcke bei äquivalenter Reibkraft übereinstimmen beziehungsweise im Bereich der berechneten Intensitäten innerhalb der Streuweite liegen. Für eine Validierung der Übertragbarkeit der Messungen mit Profilblöcken auf ganze Reifen müssten allerdings Versuche mit höherer Spurzeichnungssensitivität zur Verringerung des Toleranzbereiches und einer deutlich höheren Stichprobengröße durchgeführt werden. Weiterhin bleibt zu klären, inwiefern die Ergebnisse unter Längsschlupf auch auf Quer- und kombinierten Schlupf sowie bei Variation der Radlasten übertragbar sind.

Hinsichtlich der Sichtbarkeitsgrenze haben Versuche unter Variation von Längsschlupf und Schräglaufwinkel und subjektiver Bewertung des Vorhandenseins einer Reifenspur die Annahme bestätigt, dass bei beginnender Degressivität der μ -Schlupf-Kurve aufgrund zunehmenden Gleitschlupfs Reifenspuren entstehen können. Die bei den minimal aufgetretenen Werten von 3 % Längsschlupf beziehungsweise 1,5° Schräglaufwinkel gemessenen Reibwerte sind bis zu 50 % niedriger als die maximal erreichbaren Reibwerte der Reifen auf der Fahrbahn. Dies falsifiziert die weit verbreitete Hypothese, dass Reifenspuren nur an der Kraftschlussgrenze auftreten, allerdings ist der naheliegende Schluss, dass Reifenspuren immer schon deutlich vor dem Reibwertmaximum auftreten, nicht zulässig, da dies nur für zwei der vier Reifen beobachtet wurde.

Im Rahmen der durchgeführten Versuche konnte gezeigt werden, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der breitenbezogenen Reibkraft und der Spurintensität besteht, wenn konstante Sichtbarkeitsbedingungen herrschen sowie die Spurzeichnungssensitivität von Reifen und Fahrbahn bekannt ist. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Reifen- und Fahrbahnen sowie bei extremen Temperaturunterschieden bleibt zu prüfen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Grenzen des Modells bei Gleitgeschwindigkeiten liegen, die zu thermisch induzierten Effekten führen sowie bei stark inhomogenen oder mit Zwischenmedien kontaminierten Fahrbahnen, die die Voraussetzung einer konstanten Spurzeichnungssensitivität nicht erfüllen können.

Sollte sich das Modell in weiteren Untersuchungen bewähren, wäre eine Implementierung in Unfallrekonstruktionstools denkbar, um mit den Reifenparametern und den fahrdynamischen Größen des vorhandenen Fahrzeugmodells in Abhängigkeit verschiedener Spurzeichnungssensitivitätsklassen von Reifen- und Fahrbahntypen Reifenspuren entsprechender Intensität über der Fahrzeugtrajektorie zu simulieren.

A Anhang

A.1 VERINA-Versuche

A.1.1 Verschleißhöhe über Flächenpressung

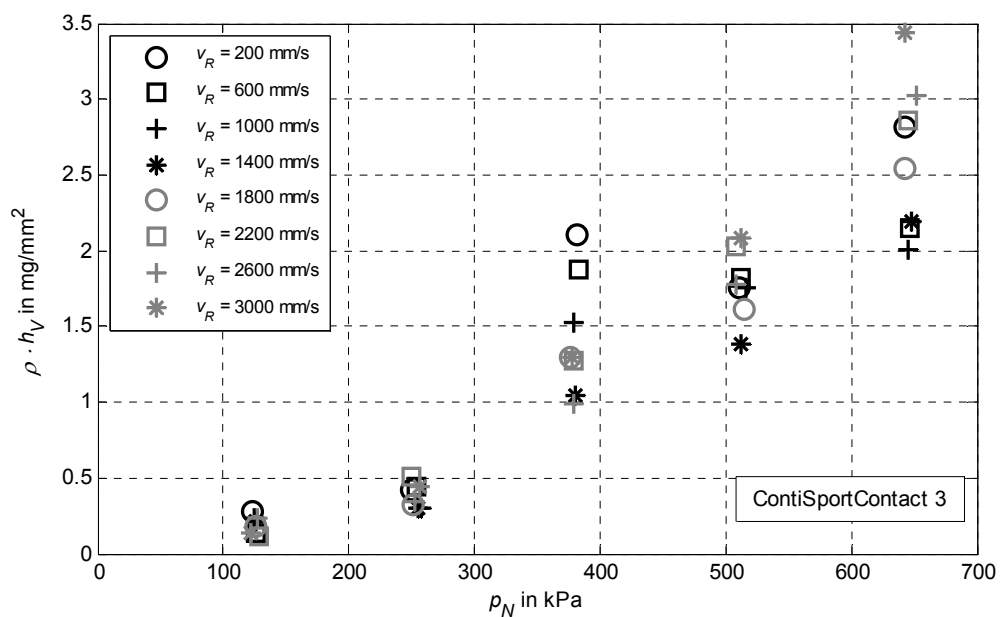


Abbildung A.1: Verschleißhöhe über Flächenpressung, ContiSportContact 3, alter Asphalt.

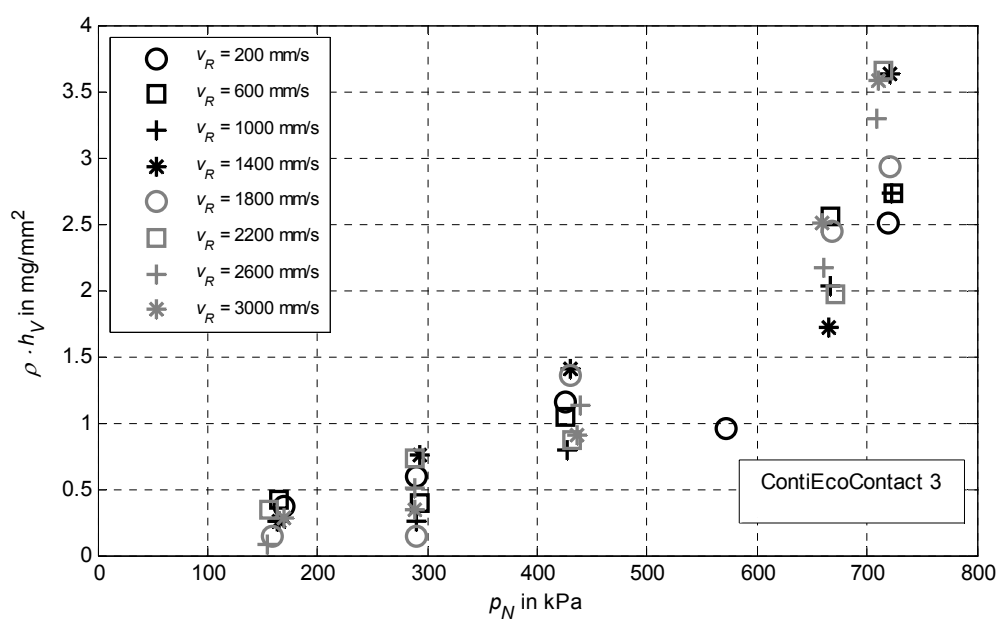


Abbildung A.2: Verschleißhöhe über Flächenpressung, ContiEcoContact 3, alter Asphalt.

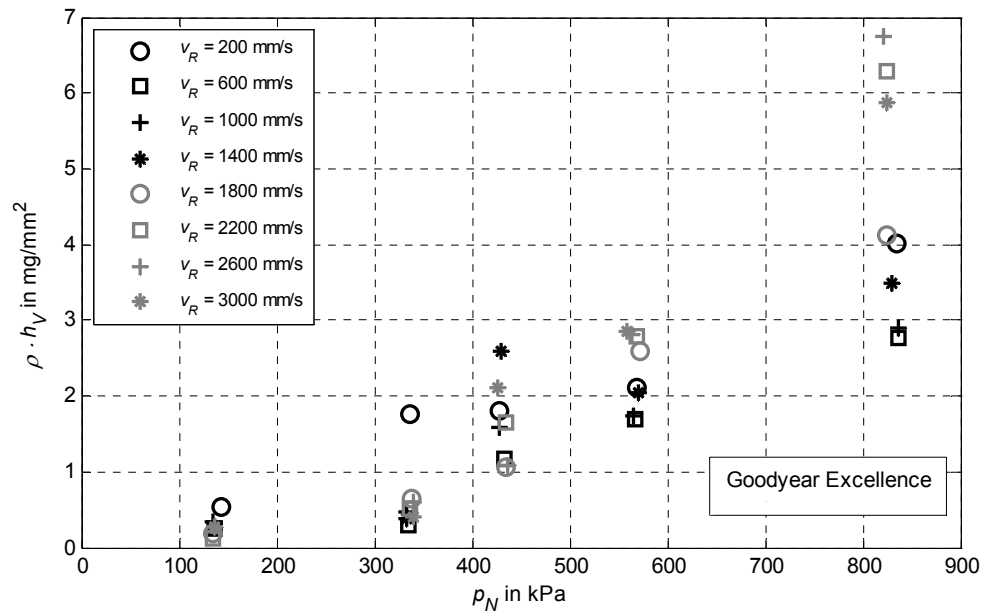


Abbildung A.3: Verschleißhöhe über Flächenpressung, Goodyear Excellence, alter Asphalt.

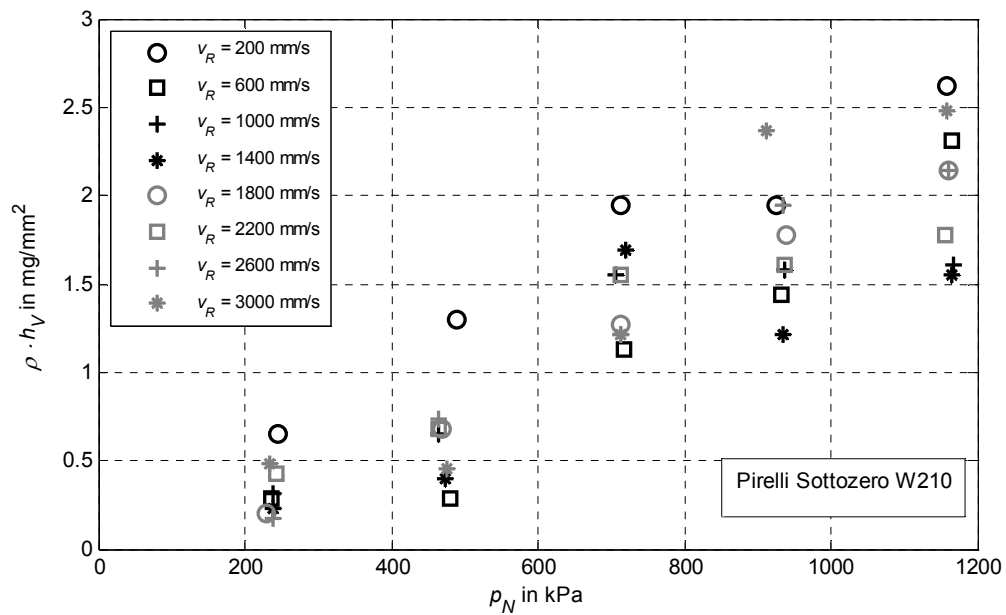


Abbildung A.4: Verschleißhöhe über Flächenpressung, Pirelli Sottozero W210, alter Asphalt.

A.1.2 Verschleißhöhe über Gleitgeschwindigkeit

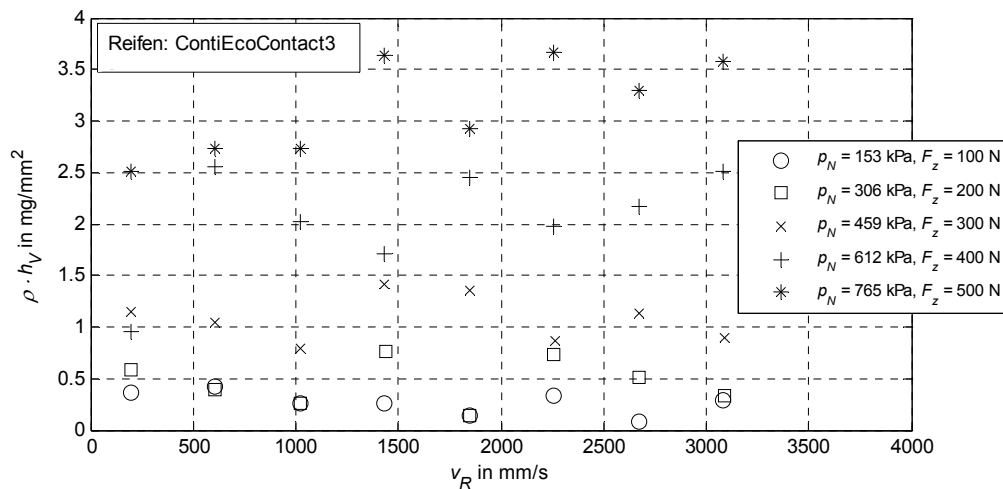


Abbildung A.5: Verschleißhöhe über Gleitgeschwindigkeit, ContiEcoContact 3, alter Asphalt.

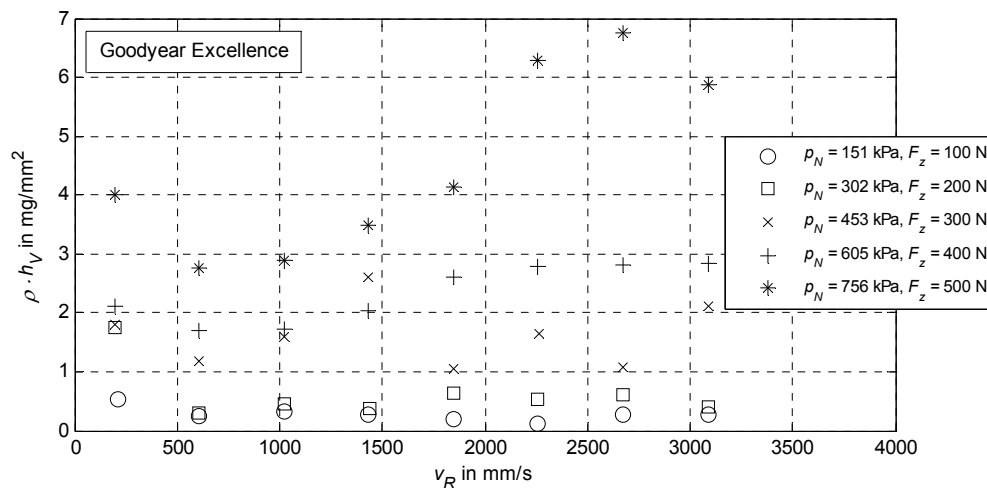


Abbildung A.6: Verschleißhöhe über Gleitgeschwindigkeit, Goodyear Excellence, alter Asphalt.

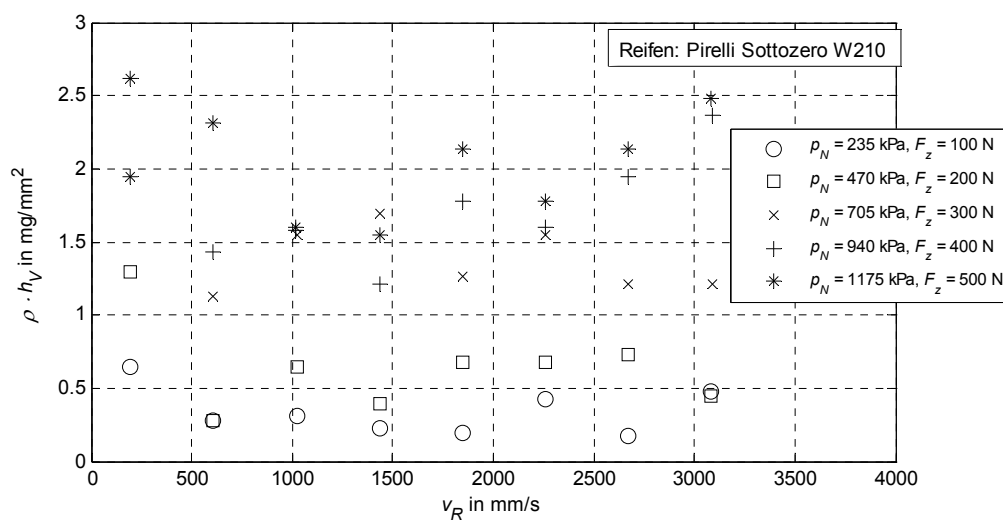


Abbildung A.7: Verschleißhöhe über Gleitgeschwindigkeit, Pirelli Sottozero W210, alter Asphalt.

A.1.3 Verschleißrate

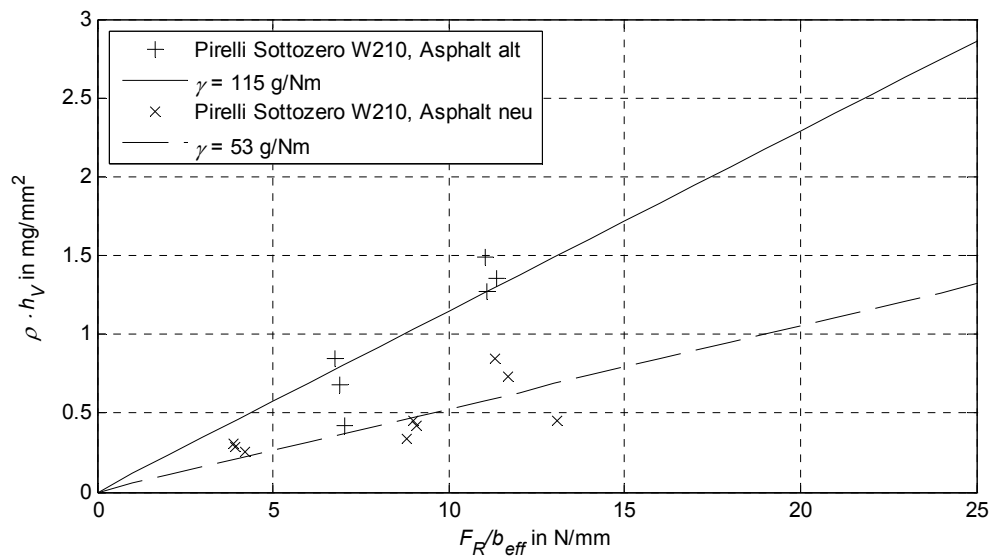


Abbildung A.8: Verschleißhöhe über breitenbezogener Reibkraft des Pirelli Sottozero.

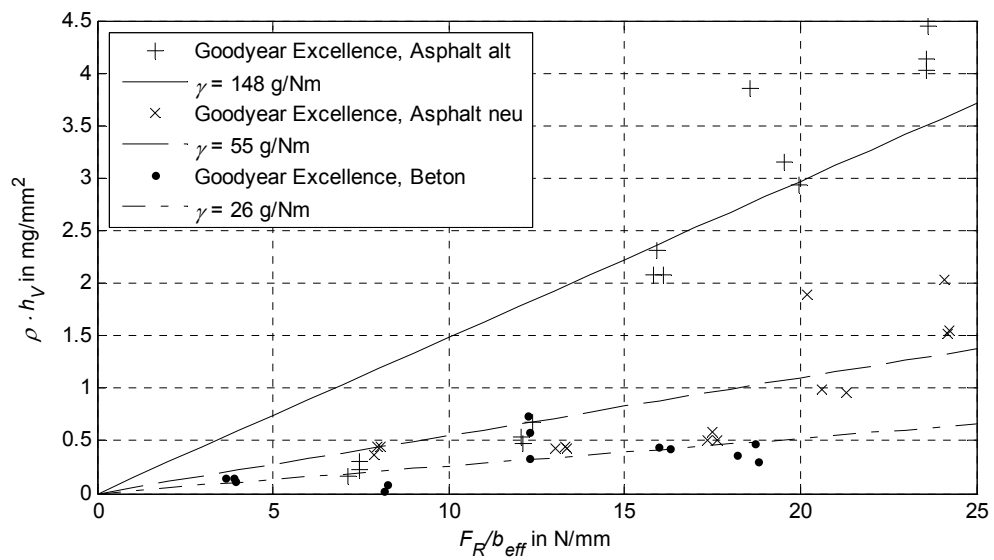


Abbildung A.9: Verschleißhöhe über breitenbezogener Reibkraft des Goodyear Excellence.

A.1.4 Schwärzungsrate

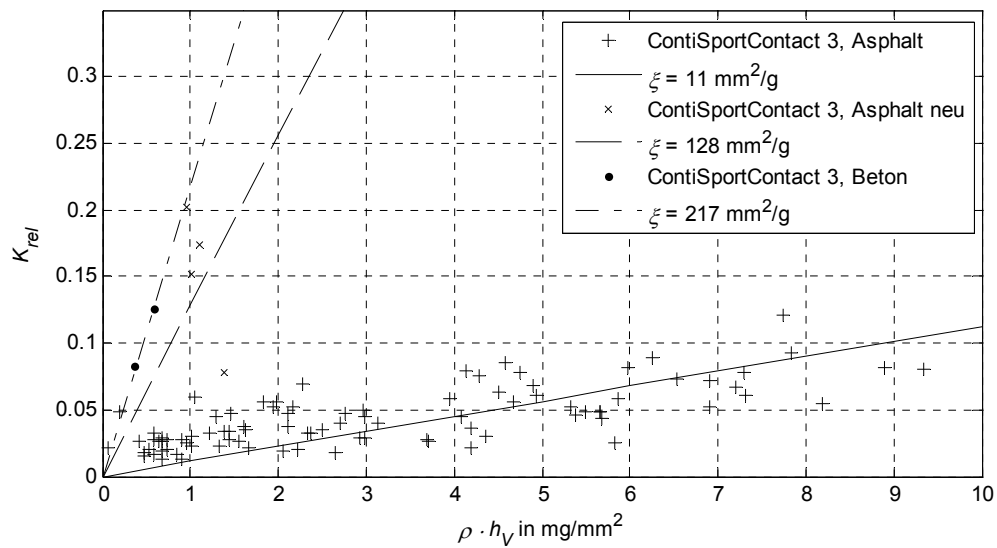


Abbildung A.10: Kontrast über dem flächenbezogenen Masseverlust für den ContiSportContact 3.

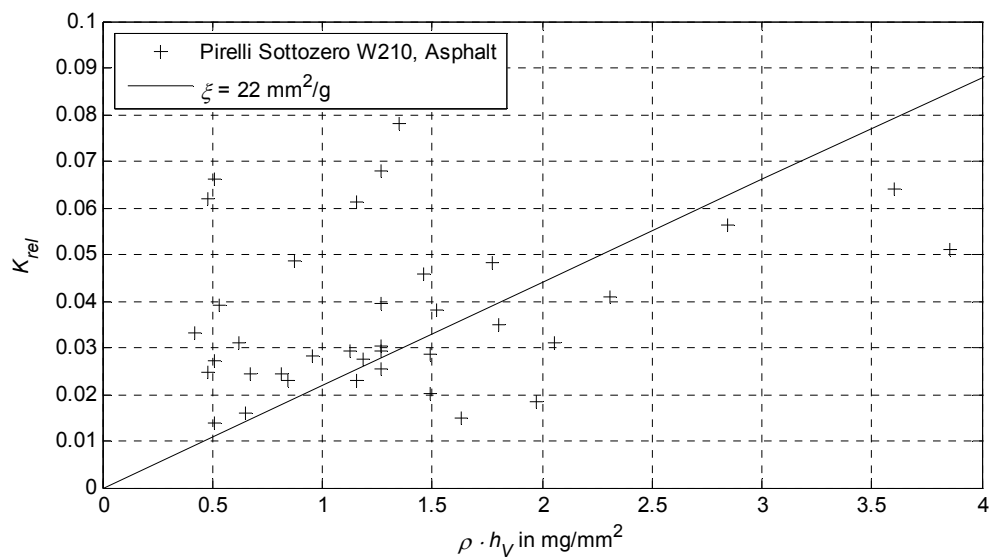


Abbildung A.11: Kontrast über dem flächenbezogenen Masseverlust für den Pirelli Sottozero W210.

A.2 PETRA-Versuche

A.2.1 Kontrast über Schlupf

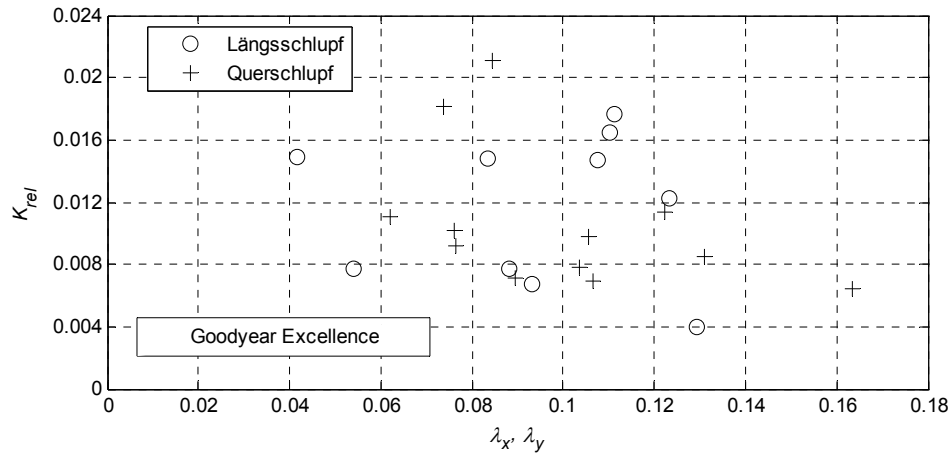


Abbildung A.12: Relativer Kontrast über Längs- und Querschlupf, Goodyear Excellence

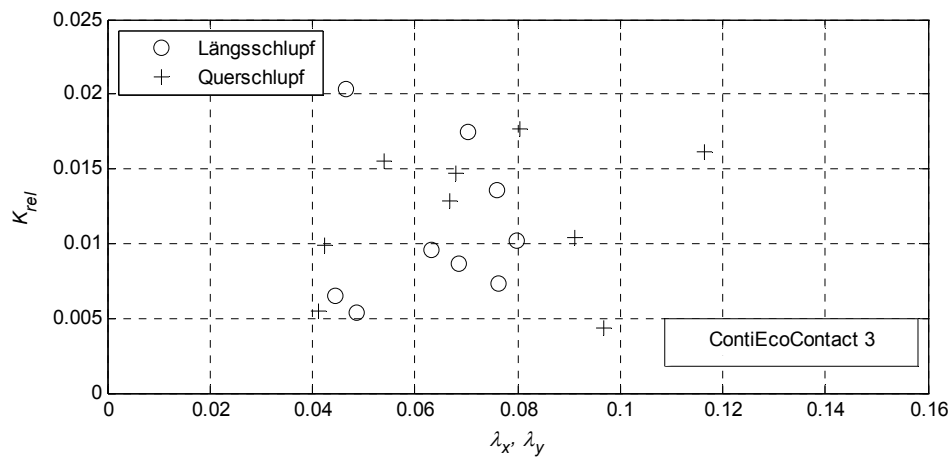


Abbildung A.13: Relativer Kontrast über Längs- und Querschlupf, ContiEcoContact 3

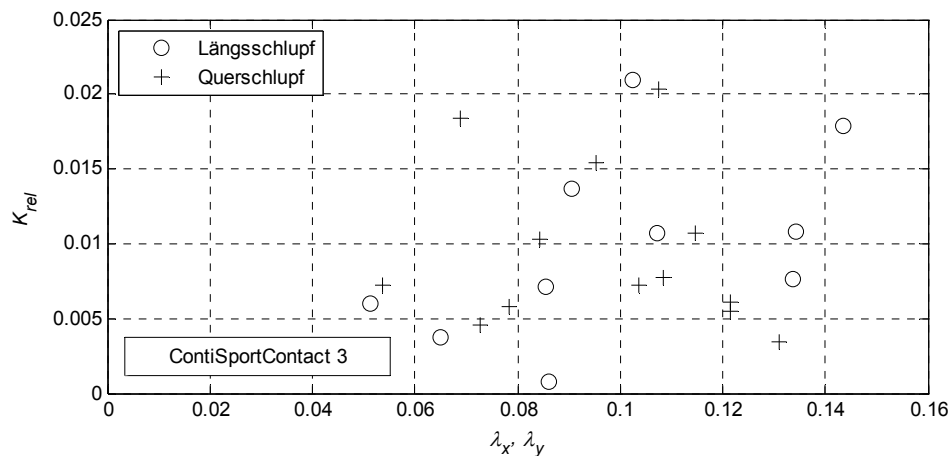


Abbildung A.14: Relativer Kontrast über Längs- und Querschlupf, ContiSportContact 3

Literaturverzeichnis

Ahlgrimm, J.; Grandel, J.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 1, in VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Vieweg Verlag/GWV Fachverlage, 1997, S. 67-74.

Ahlgrimm, J.; Grandel, J.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 2; in VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Vieweg Verlag/GWV Fachverlage, 1997, S. 135-142.

Ahlgrimm, J.; Grandel, J.: Verkehrsunfallaufnahme bei Fahrzeugen mit Anti-Blockier-System (ABS) - Teil 3; in VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Vieweg Verlag/GWV Fachverlage, 1997, S. 225-232.

Artamendi, I.; Khalid, H. A.: Diffusion Kinetics of Bitumen into Waste Tyre Rubber; 2006 Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists: From the Proceedings of the Technical Sessions, 2006, S. 133-164.

Bachmann, T.: Wechselwirkungen im Prozeß der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn; TU Darmstadt, Als Ms. gedr. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf; ISBN 3-18-336012-8, 1998, S. VI, 141.

Baumann, F. W.; Schreier, H. H.; Simmermacher, D.: Tire Mark Analysis of a Modern Passenger Vehicle with Respect to Tire Variation, Tire Pressure and Chassis Control Systems; in SAE Paper 2009-01-100, SAE International, 2009

Beauchamp, Gray et al.: Determining Vehicle Steering and Braking from Yaw Mark Striations; in SAE Paper, 2009

Brach, R. M.; Rudny, D. F.; Sallman, W.: Comparison of Tire Friction Test Methodologies Used in Accident Reconstruction

Brach, R. M.: An Analytical Assessment of the Critical Speed Formula; in SAE Paper 970957, 1997

Bullas, J. C.: Bituplaning: A Low Dry Friction Phenomenon of New Bituminous Road Surfaces, 2007

Burg, H., Rau, H.: Spurenzeichnung und Bremsverzögerung bei Notbremsungen mit Personenkraftwagen mit und ohne automatischem Blockierverhinderer; in der Verkehrsunfall, 1980

Burg, H.; Moser, A.: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, Friedr. Vieweg und Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, Wiesbaden; ISBN 978-3-8348-0172-2, 2007, S. Online-Ressource.

Bussien, R.: Automobiltechnisches Handbuch; 18. Auflage, Technischer Verlag Cram; ISBN 978 311-0027-129, 1965

- Czichos, H.; Habig, K.-H.:** Tribologie-Handbuch, Springer Fachmedien, Wiesbaden; ISBN 978-3-8348-9660-5, 2010, S. Online-Ressource (767 p.).
- Danner, M.; Halm, J.:** Technische Analyse von Verkehrsunfällen, Kraftfahrtechnischer Verlag, 1981
- Dickerson, C. P. et al.:** Evaluation of Vehicle Velocity Predictions Using the Critical Speed Formula; SAE Technical Paper 950137, 1995, doi:10.4271/950137
- Diekel, T.:** Unfallspuren auf der Fahrbahn; Unfallrekonstruktion, autorenteam GbR, Münster; ISBN 3-00-019419-3, 2007
- Dörsam, E.:** Praktische Farbmessung / Farbwissenschaften in der Papiertechnik Vorlesung im SS11; Vorlesungsskript Maschinenbau der Universität Technische Universität Darmstadt
- Engels, K.:** Die Bedeutung des Spurzeichnungsverhaltens von PKW mit ABV für die Unfallrekonstruktion; in VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Vieweg Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 1990, S. 45-48.
- Fach, M.:** Lokale Effekte der Reibung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn; TU Darmstadt, Darmstadt, 1999
- Gäbel, G.; Moldenhauer, P.; Kröger, M.:** Lokale Effekte zwischen Reifen und Fahrbahn; in Automobil Technische Zeitschrift, 2008, S. 562-567.
- Gehman, S. D.; Wilkinson Jr., C. S.; Daniels, R. D.:** Smearing of Vulcanized Rubber; in Rubber Chemistry and Technology, 1955, S. 508-518.
- Geveler, A. et al.:** Untersuchung von ABS-Spuren; in VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2011, S. 56-67.
- Golder, U.:** Bremsverzögerungen und Sturzeinleitung von Motorrädern; in VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2007, S. 102-109.
- Grandel, J.; Zomotor, A.:** Fahrzeugverhalten und Spurzeichnung beim Bremsen mit Antiblockiersystem und unfallbedingtem plötzlichem Reifendruckverlust; in Automobiltechnische Zeitschrift, 1985, S. 611-614.
- Grandel, J.:** Bremsversuche zur Untersuchung der Bremsverzögerung und der Erkennbarkeit von Bremsspuren bei einem Fahrzeug mit Automatischem Blockierverhinderer; in VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Vieweg Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 1989
- Grandel, J.:** Bremsversuche zur Untersuchung der Bremsverzögerung und der Erkennbarkeit von Bremsspuren bei einem Fahrzeug mit Automatischem Blockierverhinderer; in VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Vieweg Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 1990
- Grosch, K.A.:** Rubber Abrasion and Tire Wear; in Fall Rubber Division, ACS, 16.-18. Oktober 2007, Fall Rubber Division, ACS, Cleveland, OH, 2008, S. 470-505.

- Grosch, K.A.:** Rubber Abrasion and Tire Wear; The Pneumatic Tire, 2006
- Hafner, S.:** Vorlesung Drucktechnik - Rasterung und Mehrfarbendruck
- Halonbrenner, R.:** Die Beurteilung von Reifenspuren; in Kriminalistik, 1993, S. 201-207.
- Hough, P. V. C.:** Method and means for recognizing complex patterns, 1962
- Hutschenreuther, J.; Wörner, T.:** Asphalt im Straßenbau; Asphalt im Straßenbau, 2. Auflage, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn; ISBN 978-3-7812-1782-9, 2010
- Klempau, F.:** Untersuchungen zum Aufbau eines Reibwertvorhersagesystems im fahrenden Fahrzeug; TU Darmstadt, Als Ms. gedr. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf; ISBN 3-18-357612-0, 2003
- Knödlseeder, C.; Plöchinger, F.:** Experimentelle Ermittlung zeitgemäßer mittlerer Bremsvollverzögerungen von Personenkraftwagen; in VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Vieweg Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008, S. 46-55.
- Korn, S.:** Internetquelle <http://www.bitumen-gestein.de/>; aktualisiert 2004
- Lambourn, R. F.:** The calculation of motor car speeds from curved tyre marks; in Journal - Forensic Science Society, Forensic Science Society; ISSN 0015-7368, 1989, S. 371 - 386.
- Lambourn, R. F.:** Braking and Cornering Effects With and Without Anti-Lock Brakes; in SAE Paper, 1994
- Leser, H.; Wiek, A.:** Der Bremsvorgang; Unfallrekonstruktion, autorenteam GbR, Münster, 2007
- Liermann, H.; Stegen, G.:** Reifen- und Kautschuk-Technologie im Fahrzeugbereich, Vogel, München; ISBN 3-574-23008-7, 1985
- Marks, C.:** Pavement Skid Resistance Measurement and Analysis in the Forensic Context; in Surface Friction Conference, 2005
- Mc Henry, R.R.; Segal, D.J.; Lynch, J.P., Henderson, P.M.:** Mathematical Reconstruction of Highway Accidents; 1973
- Metz, L. D.; Ruhl, R. L.:** Skidmark Signatures of Abs-Equipped Passenger Cars; SAE Technical Paper 900106, 1990, doi: 10.4271/900106
- Moldenhauer, P.:** Modellierung und Simulation der Dynamik und des Kontakts von Reifenprofilblöcken; Technische Universität Bergakademie Freiberg, 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf; ISBN 978-3-18-372012-5, 2010
- Murray, A.:** Monochrome Reproduction in Photoengraving; in Journal of The Franklin Institute, 1936, S. 721-744.
- Neptune, J. A.et al.:** Speed from skids: A modern approach; in SAE transactions, Society of Automotive Engineers, 1995, S. 687-703.

- Overgaard, R.; Johal R. Araszewski, M.; Toor A.,:** Relationships Between Pre-Skidding and Pre-Braking Speed; in SAE Paper, Society of Automotive Engineers, 2001
- Pacejka, H. B.:** Tire and vehicle dynamics, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa; ISBN 0768011264, 2002, S. XIII, 627.
- Persson, B. N. J.:** Rubber friction: role of the flash temperature; in Journal of Physics: Condensed Matter, 2006, S. 7789.
- Petersen, Jens:** Internetquelle <http://www.unfallaufnahme.info>; aktualisiert 2010, Zugriff am 14.11.2010.
- Popper, K. R.:** Logik der Forschung; 10., verb. und verm. Aufl. Auflage, Mohr, Tübingen; ISBN 978-3161462344, 1994, S. XXIX, 481.
- Reed, W. S.; Keskin, A. T.:** A Comparison of Automobile and Truck Decelerations During Emergency Braking; in SAE Paper, 1987
- Reveley, M. S.; Brown, D. R.; Guenther, D. A.:** A Comparison Study of Skid and Yaw Marks; in SAE Paper, 1989
- Roth, J.:** Untersuchungen zur Kraftübertragung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn unter besonderer Berücksichtigung der Kraftschlusserkennung im rotierenden Rad; in VDI Fortschrittberichte, VDI-Verlag, 1993
- Rábek, V.:** Optische Methoden für die Sichtbarmachung undeutlicher Spuren auf Fahrbahnen; in VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2004, S. 257-263.
- Sakai, H.; Araki, K.:** Thermal Engineering Analysis of Rubber Vulcanization and Tread Temperatures During Severe Sliding of a Tire; in TSTCA, 1999, S. 22-47.
- Schimmelpfennig, K.-H.:** Geschwindigkeitsrückrechnung auf der Basis von ABV-Spuren in Kurven/ABV-Kurvenspurgleichung; in Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1986, S. 156-158.
- Schimmelpfennig, K.-H.:** Geschwindigkeitsrückrechnung nach Spurenbild/Achskoppelverfahren; in Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1984, S. 339-342.
- Seipel, G.; Baumann, F.; Hermanutz, R.; Winner, H.:** Approach to Determine Slip Values Based on the Intensity of Tire Marks with Respect to Tire and Road Properties, SAE World Congress 2013, Detroit, Michigan, USA, 16.-18. April 2013
- Seipel, G.; Baumann, F.; Hermanutz, R.; Winner, H.:** Die Entstehung von Reifenspuren unter Berücksichtigung von Reifen und Fahrbahn; Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn, Hannover, 2011, S. 187-204.
- Seipel, G.; Kitze, R.; Winner, H.:** Portable Test Facility for Determining Tire-Marking Sensitivity; in Tire Technology International-Annual Review 2011, 2011, S. 67-68.
- Simmermacher, D.; Baumann, F. W.; Schreier, H.-H.:** Pkw-Drift und -Schleuderspuren unter Einfluss der Regelsysteme ABS und ESP und der Parameter

Reifenart und Reifendruck; in VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Vieweg Verlag/GWV Fachverlage, 2009, S. 285-293.

Simmermacher, D.; Baumann, F.; Schreier, H.-H.: Pkw-Reifenspuren unter Einfluss der Regelsysteme ABS und ESP und der Parameter Reifenart und Reifendruck; in VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2009, S. 166-175.

Simon, K.: Farbe im Digitalen Publizieren, Springer, Dordrecht; ISBN 978-3-540-37329-2, 2007, S. Online-Ressource (351 p.).

Tollenaar, D.; Ernst, P. A. H.: Optical Density and Ink Layer Thickness; in Proceedings of International Conference of Printing Research Institute (IARIGAI), Proceedings of International Conference of Printing Research Institute (IARIGAI), 1962, S. 214-234.

Veith, A.G.: The Most Complex Tire-Pavement Interaction: Tire Wear; The tire pavement interface, ASTM, Philadelphia, PA; ISBN 0-8031-0497-9, 1986, S. 125-158.

Wang, Y.-W.; Wu, J.-D.: Skidmark Patterns and Identification of ABS-Equipped Passenger Car; in Transportation research. Part C, Emerging technologies, Elsevier, 2005

Wang, Y.-W.; Lin, C.-N.: A line-based skid mark segmentation system using image-processing methods; in Transportation research. Part C, Emerging technologies, Elsevier, 2008, S. 390-409.

Wang, Y.-W.: A distance-based matching model for classifying tire-marks at accident scene; in Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2003

Wang, Y.-W.: A Tire-Mark Identification Scheme for Suspected Vehicle Detection in Hit and Run Accident; in Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2005, S. 3441-3452.

Weber, R.: Reifenführungskräfte bei schnellen Änderungen von Schräglauf und Schlupf; TU-Karlsruhe, 1981

Winner, H.: Fahrdynamik und Fahrkomfort; Vorlesungsskript Maschinenbau der Universität TU Darmstadt

Winner, H.: Kraftfahrzeugtechnik; Vorlesungsskript Maschinenbau der Universität Technische Universität Darmstadt

Xu, R.; Pekarovicova, A.; Fleming, P.D.; Wang, X.-Q.: Study of Ink Mileage Curve of Gravure Printing

Yamazaki, S.; Akasaka, T.: Buckling Behavior in Contact Area of Radial Tire Structure and Skid Marks Left by Tires; in JSAE Review, 1988, S. 51-55.

Zeller, Peter: Handbuch Fahrzeugakustik; 1. Aufl. Auflage, Vieweg+Teubner (GWV), s.l.; ISBN 978-3-8348-9322-2, 2009, S. Online Ressource (30847 KB, 366 S.).

Eigene Veröffentlichungen

Sardá, A.; Seipel, G.; Winner, H.; Semsch, M.: Wirkungskette der Entstehung von Hotspots und Heißrubbeln in Scheibenbremsen, 23. Internationales μ -Symposium, Bad Neuenahr, 24.-25. Oktober 2008, VDI Fortschrittsberichte Reihe 12, Nr. 689, S. 58-91, VDI Verlag, Düsseldorf, 2008

Sardá, A.; Betz, A.; Seipel, G.; Winner, H.; Semsch, M.; van Aken, V.: Zu den Entstehungsmechanismen von Hotspots und Heißrubbeln - Erkenntnisse aus Versuch und Simulation, brake.tech, München, 9.-10. Dezember 2008

Stalev, I., Kelly, S., Chemistruck, H., Ferris, J.B., Seipel, G.: Studying Terrain Excitations on Ground Vehicles through International Cooperation, Proceedings of the ISTVS, Paper #ABS-32, Bremen, Germany, 2009, International Society of Terrain-Vehicle Systems

Seipel, G.; Winner, H.: Analysis of Tire Mark Characteristics, Tire Technology Expo 2011, Köln, 15.-17. Februar 2011

Seipel, G. Baumann, F.; Hermanutz, R.; Winner, H.: Analysis of the Influence of Driving Dynamic Parameters On Tire Marks, 30th Annual Meeting & Conference on Tire Science & Technology, Akron, Ohio, USA, 13.-14. September 2011

Seipel, G. Baumann, F.; Hermanutz, R.; Winner, H.: Die Entstehung von Reifenspuren unter Berücksichtigung von Reifen und Fahrbahn, 13. Internationale VDI Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn, Hannover, 25.-26. Oktober 2011, VDI Berichte 2137, S. 187-204, VDI Verlag, Düsseldorf. 2011

Seipel, G.; Kitze, R.; Winner, H.: Portable Test Facility for Determining Tire-Marking Sensitivity, Tire Technologie International Annual Review 2011, S. 67-68, UKIP Media & Events Ltd., Dorking, UK, 2011

Seipel, G.; Baumann, F.; Hermanutz, R.; Winner, H.: Approach to Determine Slip Values Based on the Intensity of Tire Marks with Respect to Tire and Road Properties, SAE World Congress 2013, Detroit, Michigan, USA, 16.-18. April 2013

Betreute studentische Arbeiten

Adick, H.; Dautfest, A.; Graupner, M.; Schäuble, K.; Zöller, C.: Entwicklung einer Messeinrichtung zur Bestimmung der Reifendaten eines Formula Student Rennwagens; Darmstadt 2012, Advanced Design Project Nr. 44/12, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Amann, P.; Didden, F.; Grewe, R.; Lohmann, F.; Rothlinger, B.; Schmeißer, B.; Wetzstein, N.: Entwicklung eines Prüfstands zur Untersuchung des Abriebverhaltens von Pkw-Reifen, Darmstadt 2010, Advanced Design Project Nr. 29/10, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Bandy, R.; Clancy, D.; Herling, M.; Rhode, N.; Robinson, J.; Sauer, A.: Development of a Wheel Hub Drive for a Formula Student Race Car, Darmstadt 2010, Advanced Design Project Nr. 30/10, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Barth, S.; Hämel, T.; Heldmann, S.; Oehler, L.; Seibel, M.: Entwicklung einer Methode zur Reibwertbestimmung in Kurvenfahrten von Motorrädern, Darmstadt 2011, Advanced Design Project Nr. 33/10, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Bauer, C.; Gondek, J.; Kandel, M.; Literman, B.; Xie, D.: Development of a Concept for the Parameter Identification of a Formula Student Race Car; Darmstadt 2011, Advanced Design Project Nr. 34/10, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Becker, D.: Entwicklung einer Methode zur Beurteilung und Bestimmung der Sichtbarkeit von Reifenspuren, Darmstadt 2010, Studienarbeit Nr. 1032/10, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Buzolin, R.; Gerl, F.; Hassis, A.; Kasabov, S.; Koev, S.: Entwicklung einer austauschbaren Seilwinde für das EVITA Zugfahrzeug, Darmstadt 2009, Advanced Design Project Nr. 26/09, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Chen, F.; Grotenhöfer, C.; Morhart, J.; Roßmann, P.; Schraft, B.; Siegl, B.; Yu, L.: Entwicklung von Rahmenkonzepten für das Dummy Target von EVITA, Darmstadt 2010, Advanced Design Project Nr. 28/10, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Chrysalidis, N.; Hessberger, N.; Kawale, S.; Mangone, S., Naranjo, S.; Pinto, E.: Development of a Wheel Hub Drive for a Formula Student Race Car, Darmstadt 2010, Advanced Design Project Nr. 31/10, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Chunjie, X.; Kettmann, N.; Lu, W.; Mader, C.; Song, C.; Tan, T.: Erweiterung eines mobilen Reibprüfstands für Reifen-Profilelemente zur Messung der Temperatur in der Kontaktfläche, Darmstadt 2012, Advanced Design Project Nr. 40/12, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Dankowski, P.; Fiebig, C.; Rodemerk, C.; Sauer, R.; Schulze, T.: Entwicklung eines aktiven Stabilisators für ein Formular Student Fahrzeug, Darmstadt 2009, Advanced Design Project Nr. 27/09, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Fishel, A.: Experimentelle Untersuchung der Intensität von Reifenspuren in Abhängigkeit des Verschleißes, Darmstadt 2012, Bachelor-Thesis Nr. 1109/12, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Flore, C.: Literaturrecherche zum Stand der Technik bestehender Modelle zur Beschreibung des Reifenverschleißes sowie der Entstehung von Reifenspuren, Darmstadt 2010, Bachelor-Thesis Nr. 1042/10, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Fuchs, W.: Entwicklung und Verifikation eines Sicherheitskonzepts für eine Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Spurzeichnungssensitivität von Reifen und Fahrbahn, Darmstadt 2011, Bachelor-Thesis Nr. 1063/11, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Goodwin, S.: Untersuchung des Einflusses eines Messverfahrens auf das Streuverhalten von Rohdaten bei der μ -Schlupf-Messung von Pkw-Reifen, Darmstadt 2011, Master-Thesis Nr. 491/11, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Güth, S.; Kransi, A.; Riffel, V.; Rot, I.: Entwicklung eines kollisionstoleranten Targethecks für die Prüfung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen, Darmstadt 2010, Advanced Design Project Nr. 32/10, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Hanke, M.: Entwicklung einer Methode zur Beurteilung und Bestimmung der Sichtbarkeit von Reifenspuren, Zwickau 2011, Diplomarbeit Nr. KTS/12/2011, Fakultät Kraftfahrzeugtechnik, Westsächsischen Hochschule Zwickau

Hochhaus, S.: Entwicklung einer mobilen Versuchseinrichtung zur Untersuchung der Spurzeichnungssensitivität von Reifen und Fahrbahn, Darmstadt 2010, Studienarbeit Nr. 1034/10, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Ivancic, B.; Keys, C.; Koonce, A.; Saffran, J.; Sommerfeld, M.; Wahl, C.: Development of a Hardware-in-the-Loop (HiL) Dynamometer of a Formula Student Race Car; Darmstadt 2011, Advanced Design Project Nr. 35/11, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Kettmann, N.: Entwicklung eines thermomechanischen Reifenmodells unter Berücksichtigung des Verschleißes in Simulink, Darmstadt 2011, Bachelor-Thesis Nr. 1082/11, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Kitze, R.: Aufbau des Steuerungs- und Messsystems einer mobilen Versuchseinrichtung zur Untersuchung der Spurzeichnungssensitivität von Reifen und Fahrbahn, Darmstadt 2011, Bachelor-Thesis Nr. 1064/11, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Kowallik, A.: Untersuchung des Streuverhaltens von Messdaten aus μ -Schlupf-Messungen von Fahrzeugreifen, Darmstadt 2010, Bachelor-Thesis Nr. 1051/10, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Schweizer, D.: Experimentelle Untersuchung der Verschleißrate von Reifenprofil-Elementen an einem Reibprüfstand, Darmstadt 2012, Bachelor-Thesis Nr. 1108/12, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Stalev, I.: Impact of Terrain Roughness on Automotive Reliability, Darmstadt 2009, REU Summer Project, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Tang, L.: Entwurf, Implementierung und Validierung einer Längsschlupfregelung für den Messanhänger PETRA, Darmstadt 2010, Studienarbeit Nr. 1026/10, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Heinz Gunther Wilhelm Seipel
Geburtsdatum: 08. März 1983
Geburtsort: Darmstadt
Staatsangehörigkeit: Deutsch

Schulzeit

08/1990 - 07/1993 Schiller-Grundschule, Darmstadt
08/1993 - 07/1994 Wolfgang-Heinze-Schule, Stralsund
08/1994 - 07/2003 Johann-Gottfried-Herder-Gymnasium, Stralsund
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife am 18. Juni 2003

Studium

10/2003 - 12/2008 Technische Universität Darmstadt,
Allgemeiner Maschinenbau
Abschluss: Diplom-Ingenieur am 16. Dezember 2008

Berufstätigkeit

01/2009 - 06/2013 Technische Universität Darmstadt,
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeug-
technik (FZD)